



Chimie des neiges et glaces antarctiques : un reflet de l'environnement

Michel Legrand

► To cite this version:

Michel Legrand. Chimie des neiges et glaces antarctiques : un reflet de l'environnement. Milieux et Changements globaux. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1985. Français. NNT : . tel-00706652

HAL Id: tel-00706652

<https://theses.hal.science/tel-00706652>

Submitted on 11 Jun 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Centre National de la Recherche Scientifique
Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement

T H E S E
PRESENTÉE A
L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE
DE GRENOBLE

pour obtenir le grade de
Docteur ès-Sciences Physiques

478

CHIMIE DES NEIGES ET GLACES ANTARCTIQUES :
UN REFLET DE L'ENVIRONNEMENT

Michel LEGRAND
Ingénieur E.S.C.I.L.

soutenue le 9 Mai 1985
devant la commission d'examen :

M. Louis LLIBOUTRY		Président,
M. Roger CHESSELET	}	Rapporteurs,
M. Robert DELMAS		
M. Gérard LAMBERT		
M. Gode GRAVENHORST	}	Examineurs
M. Gérard MOUVIER		

A V A N T - P R O P O S

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, dirigé tout d'abord par M. Louis Lliboutry, Professeur à L'Université Scientifique et Médicale de Grenoble, puis, à partir de 1984, par M. Claude Lorius, Directeur de Recherche au C.N.R.S. M. Lliboutry a bien voulu accepter la présidence de ce Jury, je l'en remercie vivement.

M. Robert Delmas, Maître de Recherche au C.N.R.S., a suivi et dirigé ce travail avec enthousiasme. Je lui dois beaucoup pour m'avoir, au cours de ces quatre années, assuré d'excellentes conditions de travail et encouragé à aller de l'avant à chaque nouvelle étape. Par ailleurs, la qualité de ce travail a été grandement favorisée par le fait qu'il m'ait permis de déborder très rapidement du cadre étroit fixé initialement à ces recherches.

M. Roger Chesselet, Directeur de Recherche au C.N.R.S. et Directeur du P.I.R.O. a bien voulu consacrer du temps à un examen minutieux du manuscrit. Ses conseils ont été très profitables à la présentation finale de ce document et je l'en remercie vivement.

Je remercie M. Gérard Lambert, Professeur à l'Université de Picardie, d'avoir accepté de faire partie du Jury et d'avoir bien voulu rapporter sur les 400 pages de ce manuscrit.

Je remercie MM. Gérard Mouvier, Professeur à l'Université de Paris VII, et Gode Gravenhorst, docteur de l'Université de Francfort, de m'avoir fait l'honneur d'être membres du Jury.

Il m'est particulièrement agréable de remercier ici tous mes camarades de mission en Antarctique (Claude Lorius et Michel Pourchet en 1979-80 au Dôme C; François Gillet, Jean-Robert Petit, Jacky Perrin, Alain Manouvrier, Pierre Laffont, Claude Rado et Guy Marec au Pôle Sud en 1983-84).

Je remercie également tous ceux qui ont participé durant d'autres campagnes à la collecte d'échantillons dans des conditions souvent difficiles : Michel Creseveur, Alain Manouvrier et Claude Boutron en 1980-81, Michel Pourchet en 1982-83.

Je remercie Jean-Robert Petit, chargé de recherche au C.N.R.S., qui, malgré sa charge de travail, a consacré un temps important à relire la première partie du manuscrit. Son aide efficace et son enthousiasme ont permis de mener à bien les mesures de conductivité "solide" tant au Laboratoire qu'au Pôle Sud.

Je remercie Jean-Marc Barnola qui, malgré la proximité de sa date de soutenance de thèse 3ème cycle, a su m'aider de façon décisive sur le problème des carbonates naturels dans la glace.

Je remercie Françoise Zanolini pour m'avoir initié, au cours de sa thèse 3ème cycle, aux manipulations de conductivité "solide" et pour son amitié.

Martine de Angelis, ingénieur O.R.S.T.O.M. au Laboratoire, a effectué des mesures d'aluminium sur certains échantillons et a bien voulu se prêter au petit jeu des intercalibrations entre méthodes d'analyses. Sa compétence concernant la matière insoluble a été utile pour résoudre le difficile problème de l'interférence des poussières terrigènes. Je l'en remercie beaucoup.

Je voudrais aussi remercier Julie Palais, chercheur à l'Université de Colombus (Ohio, U.S.A.), sans qui la réalisation de l'étude sur la carotte de Byrd n'aurait pu avoir lieu.

Je ne peux nommer ici tous les personnels techniques et administratifs ainsi que les très nombreux stagiaires DEA ou de 3ème cycle qui m'ont aidé par la disponibilité et la sympathie qu'ils m'ont toujours témoignée.

Je ne voudrais pas oublier Mme Marie Gusmano qui, avec beaucoup de gentillesse, a assuré la présentation de ce volumineux manuscrit et m'a fait gagner beaucoup de temps.

De même, M. Jean Charles Pugno, qui a réalisé les nombreuses figures de ce manuscrit et m'a, de plus, communiqué un peu de son savoir-faire pour la présentation graphique des résultats.

Enfin, M. Claude Lorius ne m'en voudra pas d'être remercié à cette ultime place. Elle ne correspond certes pas à la qualité de son aide. Elle témoigne au contraire de la gratitude toute spéciale que j'ai pour lui, en raison des conseils et encouragements enthousiastes que j'ai reçus de sa part, tant au niveau du travail de laboratoire que des missions en Antarctique. Il aurait sa place dans ce Jury si une longue campagne à la Station de Vostok ne le retenait loin de Grenoble.

I N T R O D U C T I O N

Au cours des deux dernières décennies, l'émergence de différents problèmes liés à la pollution atmosphérique (ozone stratosphérique, pluies acides, gaz carbonique...) a montré que l'atmosphère est un milieu vulnérable et que les polluants qui y sont introduits ont tendance à avoir des effets non seulement à l'échelle locale, mais aussi à l'échelle régionale ou même globale.

Les études relatives à l'aérosol atmosphérique se sont multipliées et la chimie atmosphérique, qui avait progressé après la guerre essentiellement aux U.S.A. et en Allemagne, a commencé à se développer aussi en France.

On peut faire de la chimie atmosphérique soit en travaillant directement sur l'air, soit en analysant les précipitations qui ramènent au sol des impuretés dont la composition est fonction de la composition de l'aérosol atmosphérique. La fonction de transfert air-neige n'est certes pas une relation simple, mais en première approximation, il semble raisonnable de lier les variations de la chimie de la précipitation à celle de l'aérosol.

Les régions polaires sont à plusieurs égards remarquables. L'atmosphère y est très pure, ce qui contribue à simplifier la chimie atmosphérique. Les apports de matière, déjà particulièrement réduits pour ce qui est des sources terrigène et marine, sont encore peu perturbés par l'Homme.

De plus, les précipitations solides s'y accumulent de façon régulière, emmagasinent ainsi sur de très longues périodes de temps nombre d'informations sur l'Environnement atmosphérique de l'époque à laquelle elles se sont déposées.

L'étude chimique de ces archives glaciaires - ou glaciologie - est un domaine de recherche relativement neuf, permettant en principe de connaître quel était l'aérosol atmosphérique du passé, quand régnaient à la surface du globe des conditions climatiques parfois très différentes de ce qu'elles sont actuellement.

Le présent travail porte essentiellement sur l'Antarctique. Que savions-nous à l'époque où cette étude a démarré ? Des études préliminaires avaient montré que le soluble représentait en fait la presque totalité des impuretés présentes et que la précipitation était généralement légèrement acide. Mais beaucoup de travaux publiés étaient peu fiables en raison des problèmes de contamination, pas toujours maîtrisés entièrement. Les techniques analytiques disponibles avaient favorisé les recherches sur les métaux, alors que certains ions, pourtant majeurs, n'avaient pas été systématiquement étudiés.

Nous avons, par ce travail, voulu obtenir une vue beaucoup plus cohérente que par le passé sur la chimie de la précipitation Antarctique. Nous espérons, grâce à un échantillonnage ayant une couverture spatiotemporelle particulièrement étendue, être parvenus à l'objectif que nous nous étions fixé. Au lecteur de juger.

S O M M A I R E

CHAPITRE I

PARTIE ANALYTIQUE

1	-	INTRODUCTION	15
2	-	MESURE DE L'ACIDITE OU TENEUR EN PROTON (H^+).....	16
		2.1. PRINCIPE ET CONDITIONS OPERATOIRES	16
		2.2. PROBLEME DU "BLANC D'ACIDITE"	17
		2.3. ACIDES FORTS ET ACIDES FAIBLES	18
3	-	LA CHROMATOGRAPHIE IONIQUE	20
		3.1. LE PRINCIPE	20
		3.2. APPAREILLAGE UTILISE	23
		3.3. CONDITIONS DE TRAVAIL ET OPTIMISATION SUR LE CHROMATOGRAPHE A IONS	24
		3.3.1. Choix de l'éluant utilisé	24
		3.3.2. Choix du mode et du volume d'injection....	29
		3.3.3. Conditionnement des colonnes	29
		3.4. ETALONNAGES.....	31
		3.5. INTERCALIBRATIONS.....	36
		3.6. COMPARAISON DE LA CHROMATOGRAPHIE IONIQUE AUX AUTRES TECHNIQUES ANALYTIQUES	38
4	-	LES CONTAMINATIONS	40
		4.1. NETTOYAGE DU MATERIEL	40
		4.2. CONTAMINATION PAR LES GAZ AMBIANTS	41
		4.3. CONTAMINATION AU NIVEAU DU PRELEVEMENT	45
		4.3.1. Les puits glaciologiques	45
		4.3.2. Traitement des carottes de névé	46
		4.3.3. Traitement des carottes de glace	51
		4.3.4. Conclusions	55

CHAPITRE IISITES ET TECHNIQUES DE PRELEVEMENT

1	-	PRELEVEMENTS DE SURFACE SUR L'AXE DUMONT D'URVILLE - DOME C	58
2	-	PRELEVEMENTS DE NEIGE COUVRANT LES VINGT CINQ DERNIERES ANNEES	58
		2.1. LE DOME C	58
		2.2. LE POLE SUD	59
		2.3. LA BALISE D 55	59
		2.4. LA BALISE D 80	60
3	-	SERIES SECUAIRES	60
		3.1. LE DOME C	60
		3.2. LE POLE SUD	61
4	-	LES FORAGES PROFONDS	61
		4.1. LE DOME C (905 m)	62
		4.2. VOSTOK (950 m)	62
		4.3. BYRD (2150 m)	62
		4.4. LA BALISE D 10 (300 m)	62

CHAPITRE IIICHIMIE DE LA PRECIPITATION

1	-	INTRODUCTION	66
2	-	RESULTATS LES PLUS RECENTS RELATIFS A LA PARTIE SOLUBLE DES IMPURETES	67
3	-	TERMINOLOGIE ET UNITES UTILISEES	68

4	-	BILAN IONIQUE ET IDENTIFICATION DES COMPOSES DANS LA NEIGE DE SURFACE	71
4.1.		BALANCE IONIQUE DE LA NEIGE DE SURFACE	71
4.2.		CONSTITUTION DE LA PARTIE SOLUBLE DES IMPURETES ET COMPARAISON AVEC LES RESULTATS ANTERIEURS	78
4.3.		RECONSTITUTION DE L'ACIDITE DE LA NEIGE DE SURFACE.	
4.4.		IDENTIFICATION DES COMPOSES CHIMIQUES RESPONSABLES DES ECARTS OBSERVES ENTRE LE RAPPORT Cl:Na DANS LA NEIGE ET DANS L'EAU DE MER	89
4.5.		CONCLUSIONS	90
5	-	BILAN IONIQUE ET RECONSTITUTION DES COMPOSES : CAS DE LA DERNIERE GLACIATION	92
5.1.		PROBLEMES LIES A LA PRESENCE IMPORTANTE D'ALUMINO-SILICATES	92
5.2.		TESTS ANALYTIQUES	93
5.3.		BALANCE IONIQUE DE LA GLACE D'IL Y A 18000 ANS	100
5.4.		IDENTIFICATION DES COMPOSES CHIMIQUES PRESENTS DANS LA GLACE D'IL Y A 18000 ANS	100
5.5.		CONCLUSIONS	111

CHAPITRE IV

GLACIOCHIMIE DE LA NEIGE SOUS LES CONDITIONS CLIMATIQUES ACTUELLES

1	-	INTRODUCTION	113
2	-	VARIATIONS DE LA TENEUR EN IMPURETES PROVENANT DE L'AEROSOL MARIN	115
2.1.		CHOIX D'UN INDICATEUR DES EMBRUNS MARINS	115
2.2.		VARIATIONS GEOGRAPHIQUES.....	118
2.2.1.		Variations sur les quatre cents premiers kilo- mètres de l'axe Dumont d'Urville-Dôme C	118

2.2.2. Etude de la neige à D 55, D 80, Dôme C et Pôle Sud (période 1959-1969)	122
2.2.3. Comparaison de la période holocène à D 10, Byrd, Dôme C et Vostok	129
2.3. VARIATIONS SAISONNIERES ENREGISTREES DANS LA NEIGE.....	132
2.4. ETUDE ET INTERPRETATION DU RAPPORT Cl/Na DANS LA NEIGE ANTARCTIQUE	136
2.4.1. Variations spatiotemporelles du rapport Cl/Na en Antarctique	136
2.4.1.1. Variations en surface sur l'axe Dumont d'Urville-Dôme C	136
2.4.1.2. Différences observées sur la période 1959-1969 à D 55, D 80, Dôme C et Pôle Sud.....	137
2.4.1.3. Variations saisonnières au Pôle Sud....	138
2.4.1.4. Variations séculaires au Dôme C	140
2.4.1.5. Comparaison de la période holocène à Byrd, D 10, Dôme C et Vostok	140
2.4.2. Synthèse des résultats	144
2.4.3. Discussion	144
2.4.3.1. Examen des différentes sources d'HCl possibles	144
2.4.3.2. Le rapport Cl/Na : un indice de continentalité antarctique	149
2.4.3.3. Incorporation d'HCl dans la neige	150
 3 - VARIATIONS DES TENEURS EN ACIDE SULFURIQUE	
3.1. "BRUIT DE FOND D'ACIDE SULFURIQUE" d'ORIGINE NON VOLCANIQUE	153
3.1.1. Variations géographiques	153
3.1.1. 1. Variations sur les quatre cents premiers kilomètres de l'axe Dumont d'Urville-Dôme C.....	153
3.1.1. 2. Etude comparative de la neige à D 55, D 80, Dôme C et Pôle Sud (période 1959-1969).....	157
3.1.1. 3. Comparaison de la période holocène à D10, Byrd, Dôme C et Vostok	162

3.1.2. Variations saisonnières au Pôle Sud.....	164
3.1.3. Variations séculaires au Dôme C	167
3.1.4. Discussion	170
3.2. PALEOVOLCANISME DES 200 DERNIERES ANNEES	175
3.2.1. Introduction	175
3.2.2. Les méthodes de détection	177
3.2.2. 1. La conductivité statique ou conductivité "solide"	177
3.2.2. 2. La conductivité liquide	178
3.2.2. 3. La teneur en sulfate	178
3.2.2. 4. Mesure de l'acidité	179
3.2.2. 5. Nécessité du bilan ionique	179
3.2.3. Recherche du paléovolcanisme sur les 200 dernières années	180
3.2.3. 1. Datation des couches de neige au Dôme C (0 à 15 m)	180
3.2.3. 2. Evènements volcaniques enregistrés dans la neige du Dôme C	183
3.2.3.2.1. Teneur en acide sulfurique des couches de neige	183
3.2.3.2.2. Identification des évènements enregis- trés dans la neige	188
3.2.3.2.3. Retombées d'acide halogénés d'origine volcanique	195
3.2.3. 3. Recherche du paléovolcanisme en d'autres sites de l'Antarctique	197
3.2.3.3.1. Recherche de l'horizon Tambora-Galung- gung par conductivité dans la neige du Pôle Sud	197
3.2.3.3.2. Horizon Tambora-Galunggung dans la neige de D 57	202
3.2.3.3.3. Recherche des retombées du Mont Agung au Pôle Sud et en Terre Adélie (balises D 55 et D 80)	203

3.2.3.4. Comparaison avec les résultats de Hammer au Groënland	204
3.2.4. Flux de retombées d'acide sulfurique.....	205
3.2.4. 1. Flux observés en différentes stations de l'Antarctique après les éruptions du Mont Agung (1963) et du Tambora (1815): influence du taux d'ac- cumulation	206
3.2.4. 2. Comparaison interhémisphérique des retom- bées d'acide sulfurique après les éruptions de l'Agung et du Tambora	215
3.2.4. 3. Comparaison des retombées globales avec les quantités émises	216
3.2.4. 4. Classement des éruptions volcaniques sur- venues depuis 1760 à partir de la masse d'acide sul- furique déposée dans la neige	217
4 - VARIATIONS DES TENEURS EN ACIDE NITRIQUE DE LA NEIGE	222
4.1. VARIATIONS SUR LES QUATRE CENTS PREMIERS KILOMETRES DE L'AXE DUMONT D'URVILLE-DOME C.....	222
4.2. ETUDE DE LA NEIGE DEPOSEE A D 55, D 80, DOME C ET POLE SUD SUR LA PERIODE 1959-1969, A DOME C, VOSTOK, D10, ET BYRD DURANT LA PERIODE HOLOCENE	222
4.3. VARIATIONS SAISONNIERES AU POLE SUD	227
4.4. MODULATION EVENTUELLE DES TENEURS EN NITRATE DE LA NEIGE PAR LE CYCLE SOLAIRE	228
4.5. AUTRES PHENOMENES ATMOSPHERIQUES POUVANT INFLUENCER LA TENEUR EN NITRATE DE LA NEIGE	232
4.6. DISCUSSION	234
5 - COMPOSITION CHIMIQUE DE LA PRECIPITATION ANTARCTIQUE	240
5.1. CONTRIBUTION RELATIVE DE L'AEROSOL PRIMAIRE ET DE L'AE- ROSOL SECONDAIRE	240

5.2. ACIDITE DE LA NEIGE	243
5.2.1. Variations géographiques	243
5.2.2. Variations temporelles	244
5.3. NEUTRALISATION DE L'ACIDITE	245

CHAPITRE V

PALEOENVIRONNEMENT DES 30 000 DERNIERES ANNEES

1 - INTRODUCTION	250
2 - ETUDE DU FORAGE DU DOME C (905 m)	252
2.1. PRESENTATION DES RESULTATS	252
2.2. IMPURETES D'ORIGINE MARINE, TERRIGENE ET ISSUES DE L'AEROSOL SECONDAIRE	256
3 - AUGMENTATION DE LA CHARGE ATMOSPHERIQUE EN AEROSOLS MARINS DURANT LA DERNIERE PERIODE FROIDE	262
4 - AUGMENTATION DE LA CHARGE ATMOSPHERIQUE EN POUSSIERES TERRIGENES DURANT LA DERNIERE PERIODE FROIDE	268
4.1. POUSSIERES INSOLUBLES	268
4.2. IMPURETES SOLUBLES	272
5 - MODIFICATIONS DES RETOMBEES D'IMPURETES ISSUES DE LA CONVERSION GAZ-PARTICULES DURANT LA DERNIERE GLACIA- TION	273
5.1. EVOLUTION DE LA TENEUR EN ACIDE NITRIQUE	275
5.2. EVOLUTION DE LA TENEUR EN ACIDE SULFURIQUE	280
5.3. EVOLUTION DE LA TENEUR EN ACIDE CHLORHYDRIQUE .	284
5.4. CONCLUSIONS	284
CONCLUSIONS	285
LISTE DES FIGURES	289

LISTE DES TABLEAUX	295
ANNEXE 1	299
ANNEXE 2	310
BIBLIOGRAPHIE	421

CHAPITRE 1

PARTIE ANALYTIQUE

1 - INTRODUCTION

Il y a encore quelques années, seules les impuretés telles que les poussières insolubles d'origine terrigène (alumino-silicates et quelques métaux), ainsi que certaines impuretés solubles issues du sel de mer (Na^+ , K^+ , Ca^{++} et Mg^{++}) commençaient à être mesurées sans trop de difficultés dans les neiges polaires. Nous disposions alors déjà, pour ces éléments, d'une bonne couverture spatio-temporelle de leur teneur dans la neige antarctique.

Paradoxalement, peu de données existaient concernant d'autres impuretés solubles comme Cl^- , NO_3^- , SO_4^{--} , H^+ et NH_4^+ , pourtant présentes dans les neiges polaires à des teneurs dix fois, voire parfois cent fois plus élevées que la plupart des métaux. La raison en était que, pour atteindre ces teneurs, on ne disposait que de techniques analytiques souvent mal commodes, peu sensibles (électrodes spécifiques, colorimétrie,...). De plus, pour les quelques valeurs disponibles, il semblait que tous les problèmes de contamination d'échantillons n'avaient pas été entièrement résolus, en particulier pour le chlore et les composés de l'azote (NO_3^- et NH_4^+).

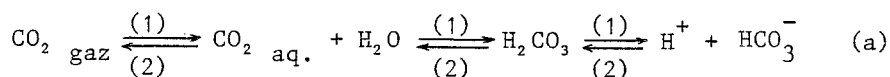
Une nouvelle technique analytique est apparue à la fin des années 70, la chromatographie ionique, plus rapide, plus sensible et bien adaptée à nos besoins. Dès le départ, cette technique permettait déjà, sans trop de difficultés, de mesurer des ions tels que NO_3^- , SO_4^{--} , Na^+ et NH_4^+ à des teneurs voisines de quelques dizaines de ng. g^{-1} .

Dans ce premier chapitre, nous exposons les difficultés rencontrées pour adapter cette technique chromatographique à la mesure des ions Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--} au niveau du ng. g^{-1} , en s'affranchissant des problèmes de contamination tant au niveau de l'analyse que du conditionnement des échantillons. Non mesurable par chromatographie ionique, le proton a dû être déterminé par ailleurs par titration acide. L'utilisation conjuguée de ces deux techniques devait permettre d'investiguer très largement la partie soluble des impuretés de la précipitation polaire.

2 - MESURE DE L'ACIDITE OU TENEUR EN PROTON

2.1. PRINCIPE ET CONDITIONS OPERATOIRES

Lors de la fusion d'un échantillon de neige ou de glace, l'eau obtenue contient non seulement les ions provenant de la dissociation des impuretés contenues dans la précipitation (en général des acides forts et des sels), mais aussi des protons (H^+) et du bicarbonate (HCO_3^-) provenant de la dissociation partielle du gaz carbonique atmosphérique :



Dans la littérature, l'évaluation de la teneur en proton est généralement effectuée à partir d'une simple mesure du pH de l'échantillon qui est ensuite corrigée en estimant la contribution en proton venant de l'acide carbonique (H_2CO_3). Cette correction serait très imprécise dans le cas de la neige antarctique, car le taux d'ionisation de l'acide carbonique pourra varier de 0 à 100% suivant l'acidité initiale de la neige (acidité généralement comprise entre 0 et $10 \mu \text{Eq. l}^{-1}$) (Legrand, Thèse 3ème cycle, 1980). L'établissement du bilan ionique de la précipitation nécessite une connaissance précise de la teneur initiale en proton, aussi, avons-nous préféré utiliser une méthode originale développée au laboratoire (Legrand, Thèse 3ème cycle, 1980; Legrand et al. 1982). Cette méthode élimine l'influence gênante du gaz carbonique en empêchant l'ionisation de l'acide carbonique (déplacement des équilibres (a) dans le sens (2)) par ajustement du pH de l'échantillon à une valeur inférieure à 4,65.

Sur une prise d'essai de cinq millilitres, nous effectuons un pré-ajout de trois cents microlitres d'acide sulfurique de normalité $5 \cdot 10^{-4} \text{N}$, puis un dosage par "additions connues" (dix ajouts de $25 \mu\text{l}$ d'acide sulfurique $5 \cdot 10^{-4} \text{N}$) suivi à l'aide d'une électrode de pH.

Pour ces conditions opératoires, la mesure de l'acidité obtenue après exploitation du dosage par la "méthode de Gran" donne une précision de $0,2 \mu \text{Eq. l}^{-1}$ pour une gamme d'acidité allant de 0 à $10 \mu \text{Eq. l}^{-1}$.

2.2. PROBLEME DU "BLANC D'ACIDITE"

Lors de la mesure de l'acidité de l'eau ultrapure fabriquée au laboratoire, nous avons toujours obtenu une valeur résiduelle non négligeable ($0,5$ à $1,0 \mu\text{Eq.l}^{-1}$) mais bien reproductible de l'acidité. L'interprétation de ce "blanc" est évidemment cruciale pour l'étude de la balance ionique; il s'agit en effet de savoir s'il représente une erreur systématique de la méthode, auquel cas il devra être soustrait des valeurs obtenues de l'acidité ou bien s'il représente une contamination de l'eau ultrapure utilisée lors des étalonnages (voir figure 1).

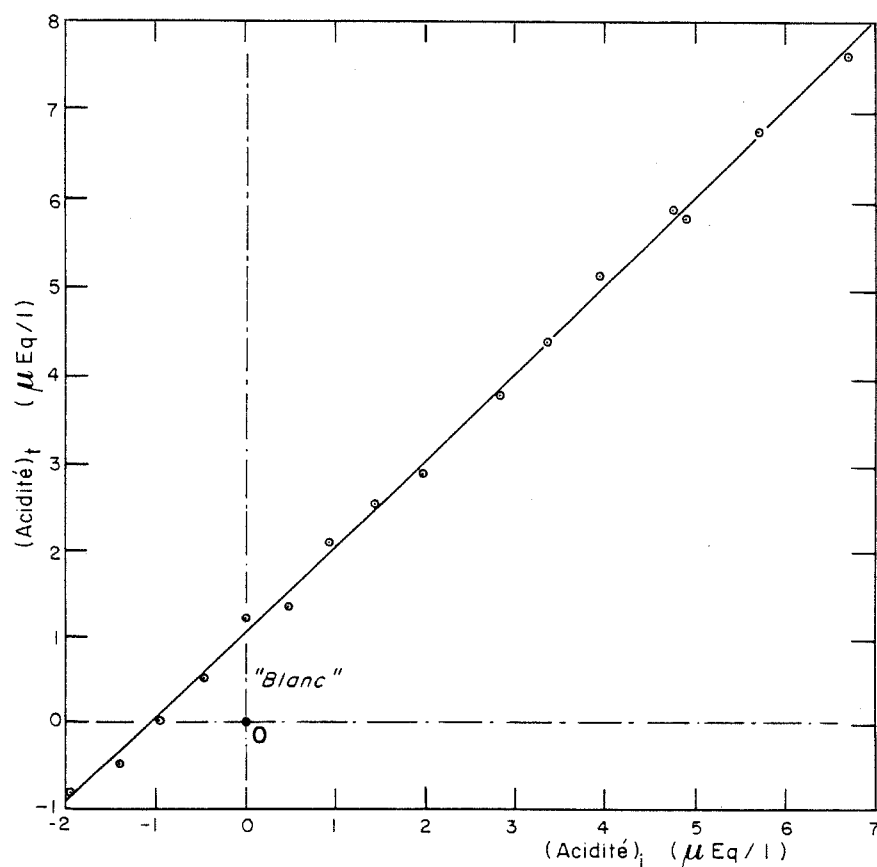


Figure 1 : Courbe d'étalonnage de l'acidité (d'après Legrand, Thèse 3e cycle)
L'acidité mesurée, notée (Acidité) _t, est reportée en fonction de
l'acidité des solutions étalons notée (Acidité) _i.

Lors de nos premières mesures de l'acidité (Legrand, Thèse 3ème cycle, 1980), le blanc avait été interprété comme étant lié à la présence d'acide chlorhydrique (HCl) à l'état de traces dans l'eau ultrapure du laboratoire (la présence de 10 à 30 ng.g⁻¹ de chlore dans cette eau ayant été mise en évidence par activation neutronique). Ultérieurement, une intercalibration du chlore par chromatographie ionique et par activation neutronique (voir paragraphe 3.5, chapitre I) a montré qu'en réalité l'eau ultrapure ne contenait pas de chlore à l'état ionique (chlorure) mais du chlore organique à l'état moléculaire (voir paragraphe 4.2, chapitre I).

D'autre part, la réalisation d'une évaporation lente de l'eau ultrapure dans une enceinte dépoussiérée avait montré une augmentation de l'acidité du concentrat obtenu (Legrand, Thèse 3ème cycle, 1980), mais en fait, l'interprétation en terme de concentration de l'acidité initiale de l'eau était fausse, car nous ne soupçonnions pas à cette époque l'importance des polluants gazeux présents dans l'atmosphère (NO₂, NH₃, voir paragraphe 4.2, chapitre I) venus fausser cette expérience.

Pour trancher ce délicat problème du "blanc", nous avons utilisé la propriété qu'ont les monocristaux de glace d'exclure les impuretés de leur réseau lors de leur formation. L'acidité d'un monocristal réalisé au laboratoire n'ayant pas donné un résultat significativement différent de l'acidité de l'eau utilisée pour sa fabrication, nous concluons que l'eau ultrapure ne contient pas de traces d'acides. Ainsi, lors de chaque série de mesures, nous contrôlons la valeur du "blanc" (en moyenne un blanc pour une dizaine d'échantillons) qui est ensuite retranchée aux valeurs brutes. Les résultats présentés tout au long de ce travail sont tous corrigés de la valeur du "blanc".

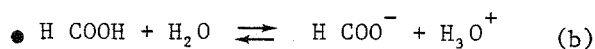
2.3. ACIDES FORTS ET ACIDES FAIBLES

De récentes études portant sur la précipitation des régions tempérées de l'hémisphère Sud (Keene et al. 1983) ont montré que la teneur en proton pouvait être non seulement liée à la présence d'acides forts (sulfurique H₂SO₄, nitrique HNO₃ ou même chlorhydrique HCl) mais aussi à la présence importante d'acides organiques, essentiellement les acides formique (HCOOH) et acétique (CH₃COOH).

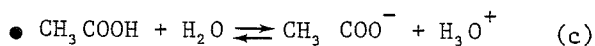
Les conditions opératoires de notre titration acide (ajustement du pH de l'échantillon à 4,65) font que l'acide formique (dont la constante d'acidité K_A vaut $10^{-3,65}$) est entièrement ionisé au début du dosage, alors que l'acide acétique ($K_A = 10^{-4,75}$) ne l'est pas.

En effet, l'ajout de 300 μ l d'acide sulfurique à $5 \cdot 10^{-4}$ N dans une prise d'essai de 5 ml donne une teneur minimale en proton de :

$$[H_3O^+] = \frac{300 \times 5 \cdot 10^{-4}}{5000 + 300} = 10^{-4,55} \quad (1)$$



$$\text{avec } K_A = \frac{[\text{H COO}^-][\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{H COOH}]} = 10^{-3,65} \quad (2)$$



$$\text{avec } K_A = \frac{[\text{CH}_3\text{COO}^-][\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]} = 10^{-4,75} \quad (2')$$

En reportant l'équation (1) dans l'expression des constantes d'acidité (2 et 2'), nous obtenons la valeur correspondante du taux d'ionisation pour ces deux acides faibles (3 et 3').

$$\frac{[\text{H COO}^-]}{[\text{H COOH}]} = 8 \quad (3) \quad \text{et} \quad \frac{[\text{CH}_3\text{COO}^-]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]} = 0,6 \quad (3')$$

Ainsi, notre mesure de l'acidité prendra en considération la présence éventuelle d'acide formique mais pas d'acide acétique.

3 - LA CHROMATOGRAPHIE IONIQUE

Il y a une dizaine d'années, la chromatographie d'échange d'ions n'était pas une technique d'analyse très performante.

En effet, la phase mobile (appelée éluant) qui régit la rétention des ions sur une phase stationnaire devait avoir une force ionique très élevée sous peine d'analyses trop longues (Rosset et al. 1975), mais cette force ionique élevée ne permettait alors plus de détecter par conductimétrie le passage des ions à faibles concentrations, lors de leur sortie de la colonne échangeuse d'ions.

Vers 1975, la mise au point d'une nouvelle technique, la chromatographie ionique, a permis de résoudre ce problème, ouvrant ainsi de très larges possibilités d'analyses (Jardy et Rosset, 1979). Le principe en est de neutraliser l'éluant en plaçant une colonne supplémentaire entre la colonne de séparation et le détecteur conductimétrique (voir figure 2), de façon à éliminer les ions constitutifs de l'éluant par réaction acide-base et à permettre ainsi la détection des ions de l'échantillon par conductimétrie dans la phase mobile devenue alors très peu conductrice.

3.1. LE PRINCIPE

Détaillons à titre d'exemple les réactions mises en jeu lors de la détermination des cations monovalents (Na^+ , NH_4^+ et K^+).

La séparation d'un mélange de ces cations par chromatographie d'échange d'ions se fait par élution au moyen d'acide fort (par exemple HCl) sur une résine échangeuse à groupement sulfonate (sous forme H^+). Lors du passage de l'échantillon sur la résine, les cations Na^+ , NH_4^+ , K^+ ainsi que l'ion H^+ sont plus ou moins longtemps retenus en fonction de leur affinité avec la résine ($\text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{H}^+$).

Pour pouvoir utiliser un système de détection conductimétrique, il faut éliminer le "bruit" produit par l'acide chlorhydrique, car H^+ est non seulement l'ion le plus concentré mais aussi le plus mobile (rappelons en effet que le proton fournira à concentrations égales un signal sept fois plus élevé que le sodium). L'utilisation d'une résine échangeuse d'ions, à groupement

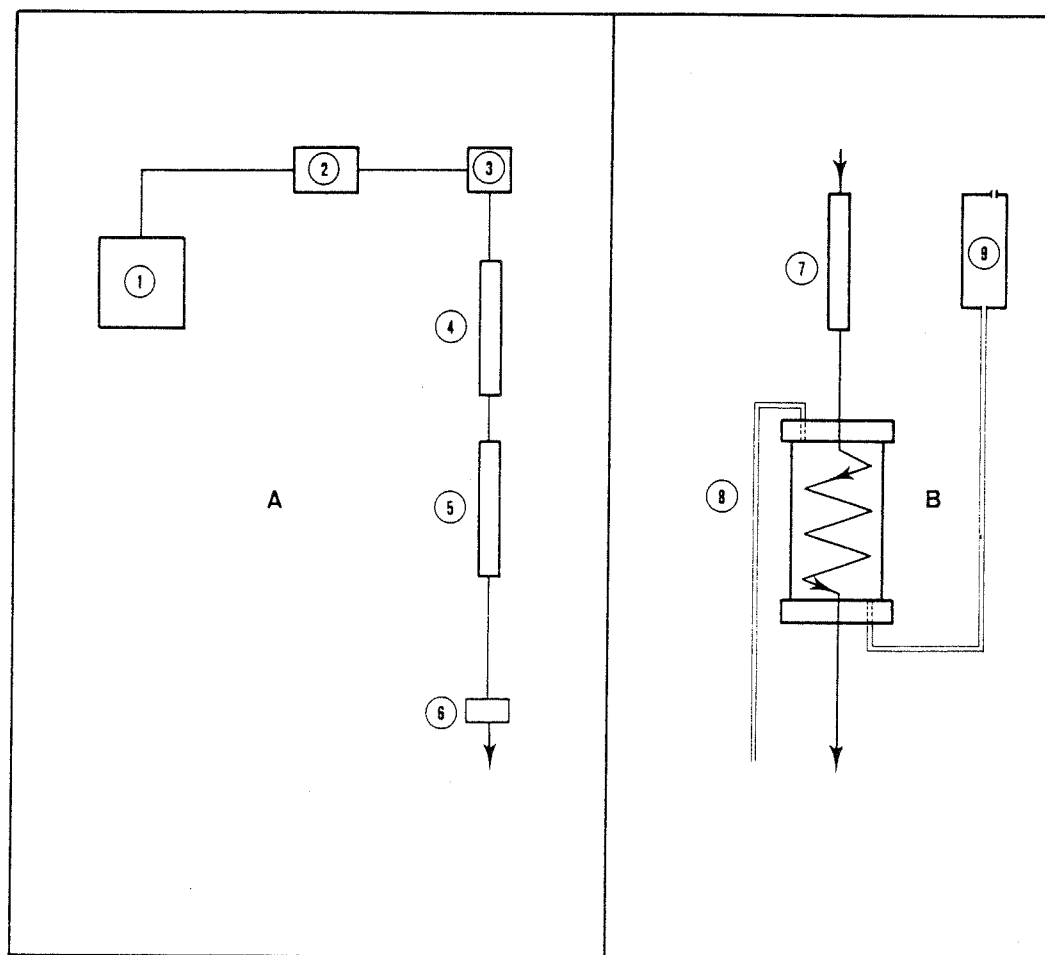


Figure 2 : Schéma de fonctionnement du chromatographe à ions

Avec une colonne de neutralisation à résine (A), avec une colonne de neutralisation à "fibres creuses" (B). (1) réservoir d'éluant, (2) pompe doseuse, (3) vanne d'injection, (4) et (7) colonnes de séparation, (5) colonne de neutralisation à résine (8) colonne de neutralisation à "fibres creuses", (9) réservoir de régénérant.

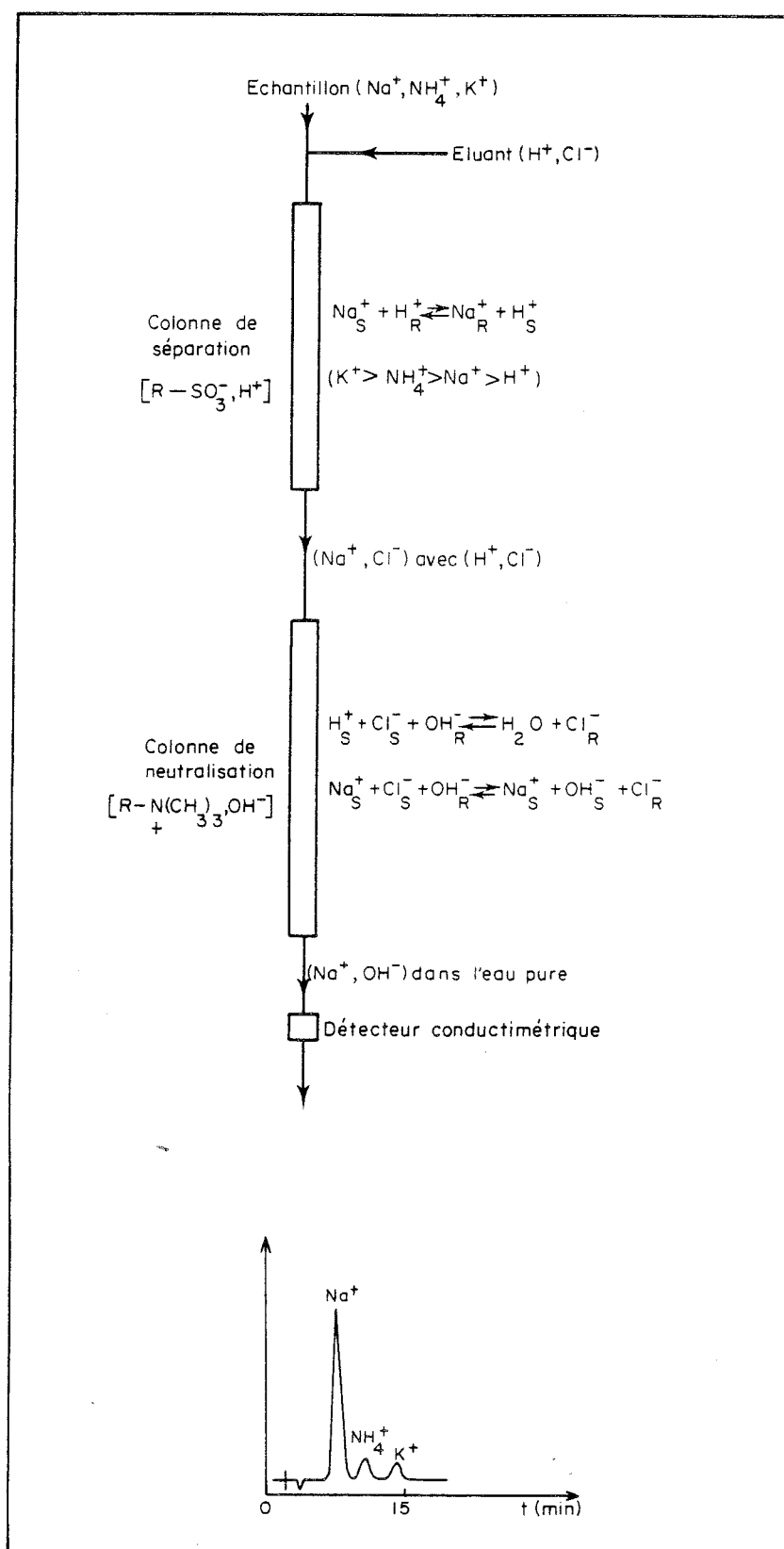


Figure 3 : Principe d'analyse d'un mélange de cations (Na^+ , NH_4^+ et K^+).

amine quaternaire (sous forme OH^-) placée en série avec la colonne de séparation, a deux fonctions; non seulement neutraliser l'éluant, mais aussi substituer les ions Cl^- associés aux alcalins par des ions OH^- , ce qui permet d'abaisser la valeur de la conductivité de l'effluent jusqu'à celle de l'eau pure et d'obtenir un gain appréciable de la sensibilité par permutation Cl^-/OH^- (l'ion OH^- étant trois fois plus mobile que l'ion Cl^-) (voir figure 3).

3.2. APPAREILLAGE UTILISE

Le Laboratoire de Glaciologie a fait d'abord l'acquisition d'un chromatographe à ions Dionex 10, commercialisé par la Dionex Corporation, U.S.A.. La première partie de ce travail a donc été effectuée sur ce premier modèle, notre laboratoire s'est ensuite équipé du modèle 2010 i, plus moderne et plus performant (meilleure tenue des raccords sur les vannes pneumatiques éliminant presque totalement les problèmes de fuite, pompe à débit plus stable et mise en place d'une correction automatique de température au niveau de la cellule conductimétrique permettant une meilleure stabilité de la ligne de base).

Le signal conductimétrique est lu sur un enregistreur Sefram à deux voies (signal de sortie du chromatographe 1 V) afin de pouvoir apprécier correctement les hauteurs de pics des différents ions même lorsqu'ils sont présents à des concentrations très différentes. Pour la mesure des cations (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{++} et Ca^{++}) nous avons utilisé le calibre $3 \mu\text{S}/\text{cm}$ du conductimètre, les calibres 1000 et 250 mV (expansion 4) sur l'enregistreur; pour les anions le calibre $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ du conductimètre, les calibres 1000 et 100 mV (expansion 10) sur l'enregistreur.

L'injection des échantillons s'effectue à la seringue (2,5 à 10 ml) dans une boucle d'injection ou dans une colonne de préconcentration (voir plus loin paragraphe 3.3.2).

3.3. CONDITIONS DE TRAVAIL ET OPTIMISATION SUR LE CHROMATOGRAPHE A IONS

3.3.1. Choix de l'éluant utilisé

L'analyse est d'autant plus sensible (grands pics) et rapide (temps de rétention courts) que le débit et la concentration de l'éluant sont élevés. On reste cependant limité par la pression maximale tolérée par les colonnes et par la bonne séparation des pics. Des tests préliminaires ont permis de fixer les conditions opératoires, réalisant un compromis entre la rapidité et la qualité d'une analyse (tableau 1).

L'analyse des anions s'effectue avec un mélange tampon carbonate-bicarbonate de sodium (Na_2CO_3 - Na HCO_3). Due à son temps de rétention court (voir figure 4-b-A), l'analyse du chlore, même en optimisant les conditions expérimentales, reste médiocre (Wetzel et al. 1979). Dans un premier temps, l'analyse du chlore a été effectuée en utilisant une colonne de séparation spécialement adaptée (4 X 125 mm) avec un éluant carbonate et soude (Na_2CO_3 et Na OH) (figure 4-b-B). Ultérieurement, l'utilisation d'une colonne de régénération à "fibres creuses" (voir paragraphe 3.3.2.) a permis de mesurer simultanément le chlore, le nitrate et le sulfate de manière satisfaisante (figure 4-c-A).

Malgré ces améliorations, il n'était pas possible, dans ces conditions, de distinguer le fluor (F^-) des acides organiques (H COOH et CH_3COOH) (figure 4-c-A); l'utilisation d'un éluant beaucoup plus faible a permis de résoudre ce problème (figure 4-c-B).

L'analyse des cations monovalents (Na^+ , NH_4^+ et K^+) peut s'effectuer avec différents acides (HCl , HNO_3 et HClO_4). Nous avons choisi l'acide chlorhydrique qui contient moins de traces de métaux lourds et risque moins, à terme, d'empoisonner la colonne de séparation.

Pour les cations divalents (Ca^{++} et Mg^{++}), l'utilisation d'un mélange de méta-phénylènediamine, dichlorhydrate et d'acide chlorhydrique même s'il minimise les problèmes posés par l'utilisation de la para-phénylènediamine, dichlorhydrate (coloration sous l'effet de la lumière, puis fixation de cette substance colorée entraînant un important raccourcissement de la durée de vie de la colonne de séparation) n'en reste pas moins d'un emploi très délicat. En particulier, une colonne de séparation doit être réservée à cette analyse car il n'est plus possible de la réutiliser ensuite pour l'analyse des cations monovalents.

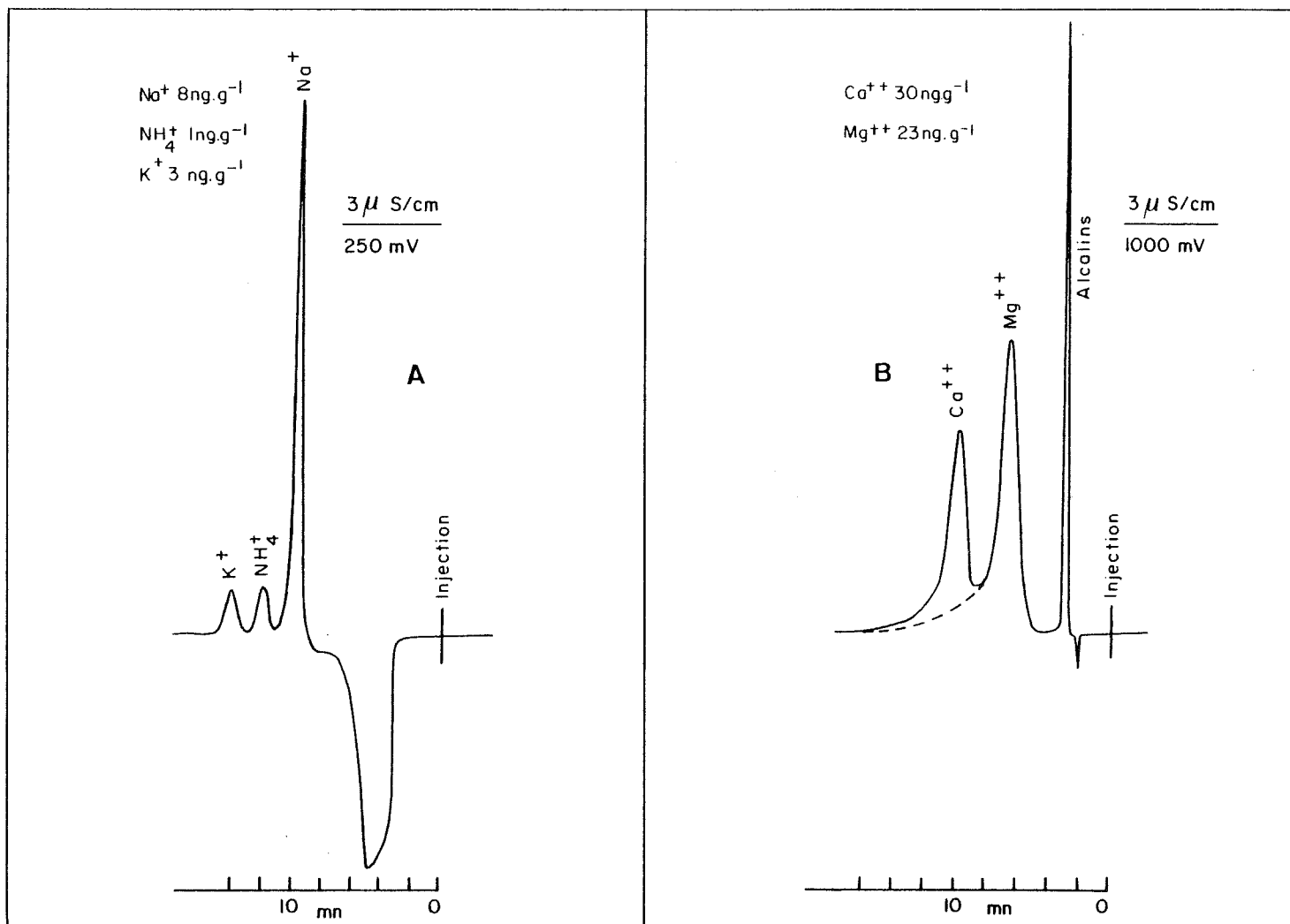


Figure 4a : Chromatogrammes obtenus pour les cations monovalents (A), pour les cations divalents (B)

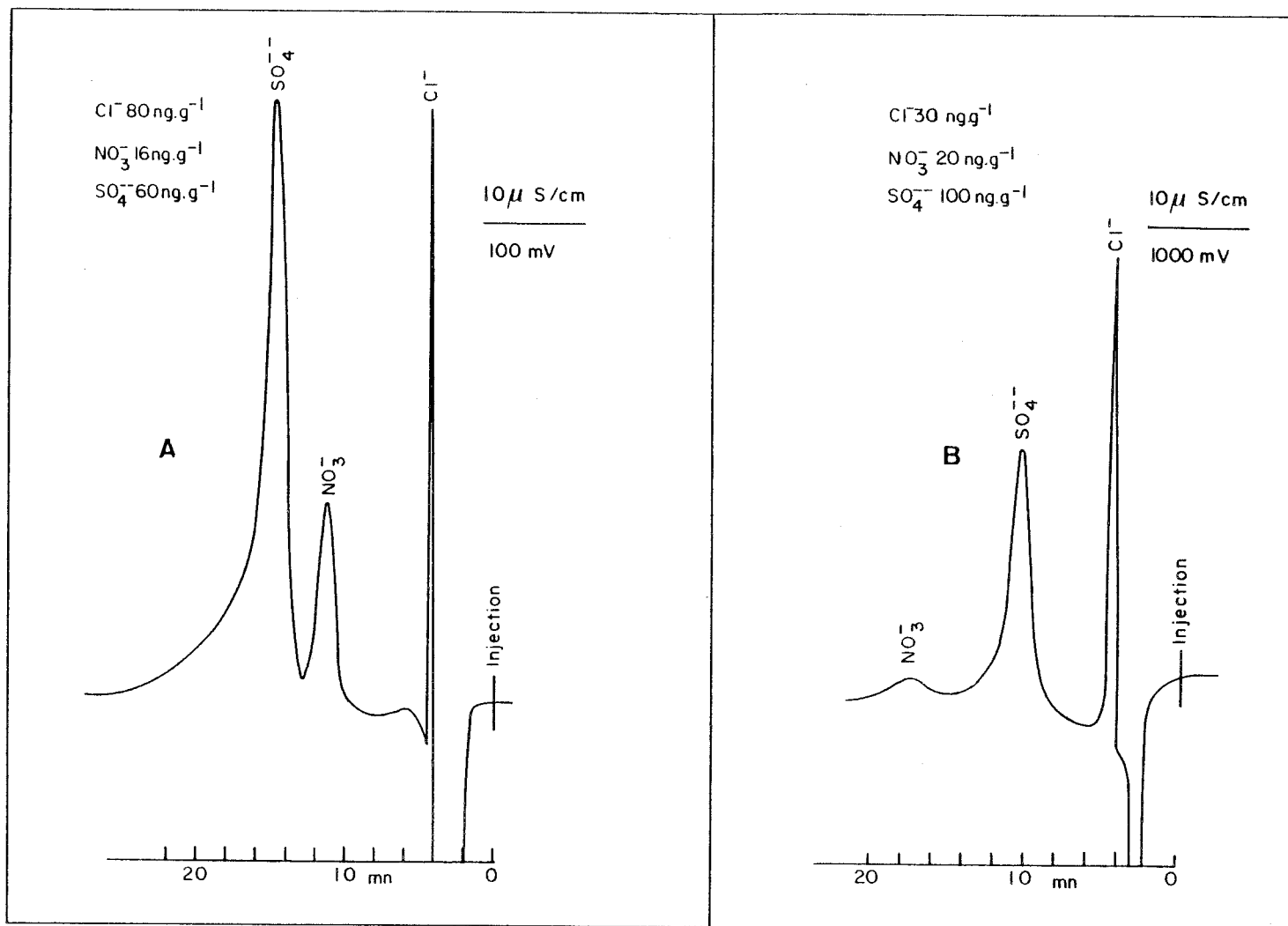


Figure 4b : Chromatogrammes obtenus pour les anions avec une colonne de neutralisation à résine :
 (A) avec la colonne de séparation conventionnelle, (B) avec une colonne de séparation lente (S_2).

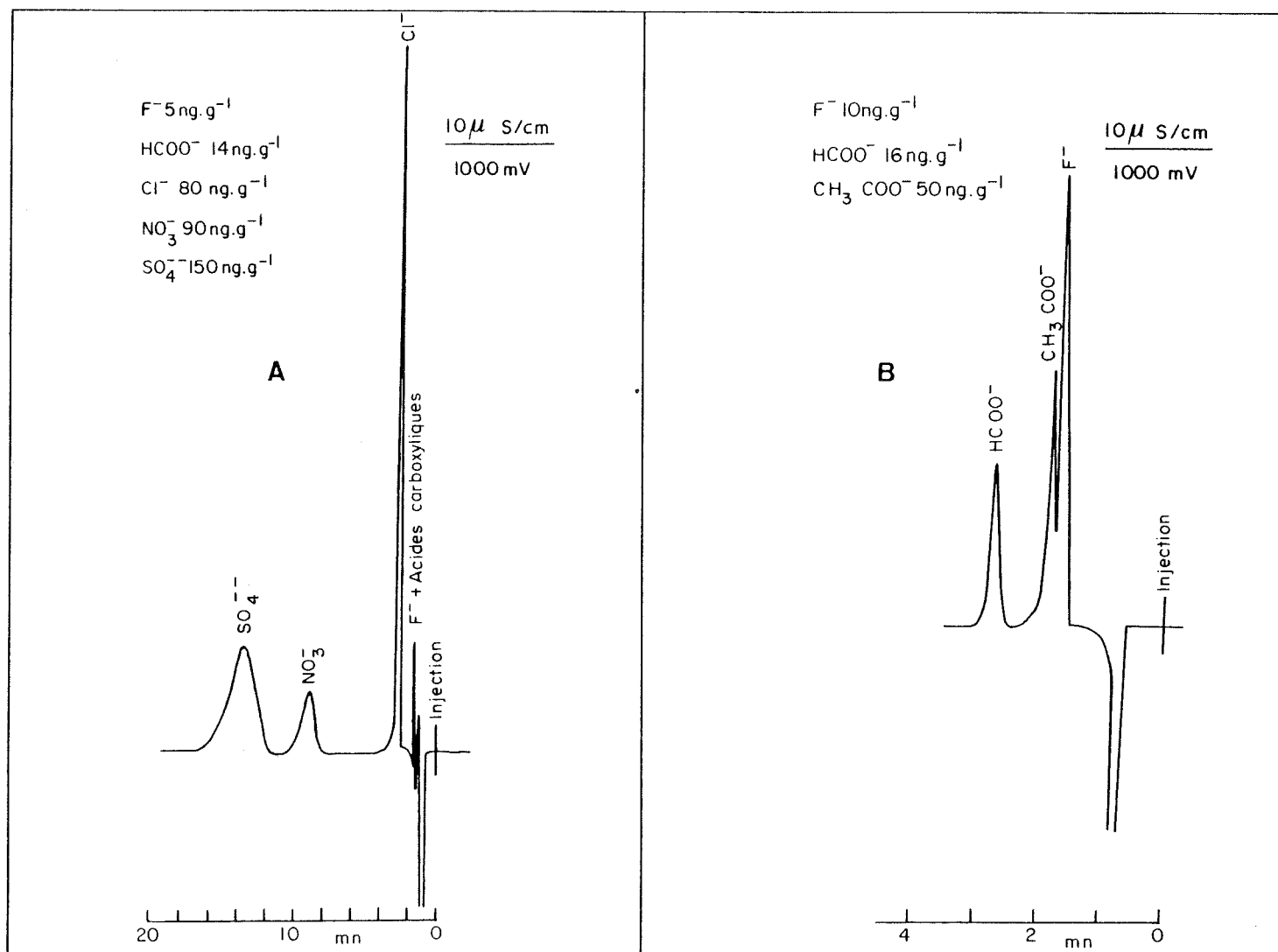


Figure 4c : Chromatogrammes obtenus pour les anions avec une colonne de neutralisation à "fibres creuses" et une colonne de préconcentration : (A) avec un éluant conventionnel, (B) avec un éluant faible.

	Colonne de séparation	Colonne de neutralisation	Nature et débit de l'éluant	Nature et débit du régénérant	Mode d'injection
Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , K ⁺ Dionex 10	6 X 250 mm	9 X 100 mm	5 10 ⁻³ M HCl 280 ml/h	0,5M NaOH	Boucle d'injection 5 - 7 ml
Mg ⁺⁺ , Ca ⁺⁺ Dionex 10	4 X 200 mm	9 X 100 mm	1,25 10 ⁻³ M m.C ₆ H ₄ (NH ₂) ₂ , 2 HCl 1,25 10 ⁻³ M HCl 138 ml/h	0,5M NaOH	Colonne de précon- centration 4 X 50 mm
NO ₃ ⁻ , SO ₄ ⁻⁻ Dionex 10	4 X 250 mm	6 X 250 mm	2 10 ⁻³ M Na ₂ CO ₃ 2,5 10 ⁻³ M NaHCO ₃ 250 ml/h	0,5M H ₂ SO ₄	Boucle d'injection 5 ml
Cl ⁻ Dionex 10	4 X 125 mm	6 X 250 mm	3 10 ⁻³ M Na ₂ CO ₃ 2 10 ⁻³ M NaOH 250 ml/h	0,5M H ₂ SO ₄	Boucle d'injection 1,5 ml
Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ⁻⁻ Dionex 2010 i	4 X 250 mm	Colonne à "fibres creuses"	2 10 ⁻³ M Na ₂ CO ₃ 2,5 10 ⁻³ M NaHCO ₃ 210 ml/h	1,25 10 ⁻² M H ₂ SO ₄	Colonne de précon- centration 4 X 50 mm
F ⁻ , HCOO ⁻ , CH ₃ COO ⁻ Dionex 2010 i	4 X 250 mm	Colonne à "fibres creuses"	1,5 10 ⁻³ M NaHCO ₃ 210 ml/h	1,25 10 ⁻² M H ₂ SO ₄	Colonne de précon- centration 4 X 50 mm

Tableau n° 1 : Conditions de travail sur les chromatographes à ions Dionex 10 et sur le 2010 i.

3.3.2. Choix du mode et du volume d'injection

Le volume d'échantillon à injecter est choisi en fonction du niveau de concentration attendu.

Pour des concentrations supérieures à 100 ng.g^{-1} , l'utilisation de boucles d'injection de $500 \mu\text{l}$ est généralement suffisante. Dans la précipitation polaire, les teneurs sont généralement voisines de quelques dizaines de ng.g^{-1} , voire même quelques ng.g^{-1} , il est donc nécessaire d'augmenter notablement le volume d'échantillon injecté.

Les notices techniques de Dionex mettaient en garde contre l'augmentation excessive du volume des boucles d'injection (provoquant un élargissement important des pics et donc une perte de sensibilité empêchant toute mesure au niveau du ng.g^{-1}). Elles préconisaient plutôt l'utilisation de petites colonnes de préconcentration, permettant de fixer les ions à analyser par percolation d'un volume important d'échantillon, 10 ml par exemple. En réalité, des tests préliminaires ont montré qu'il n'en était rien; le débit d'éluant utilisé plus élevé que pour une analyse conventionnelle venant compenser cet effet (Legrand et al. 1984).

Par contre, le pic négatif que l'on observe sur les chromatogrammes (voir figure 4 a, b, c) qui tient au fait que l'eau pure de l'échantillon a une conductivité inférieure à celle de l'effluent, peut interférer avec les ions les moins retenus (F^- et Cl^- pour une analyse d'anions, Mg^{++} pour une analyse de cations divalents). Dans ce cas, l'utilisation d'une colonne de préconcentration qui réduit de manière très significative la largeur du pic négatif de l'eau devient indispensable. Ce problème n'existant pas dans le cas des cations monovalents, nous n'avons pas utilisé de colonne de préconcentration dont l'emploi peut se révéler malcommode (perte de charge très importante).

3.3.3. Conditionnement des colonnes

Un soin tout particulier doit être accordé dans ce type d'analyse aux conditionnements des colonnes car meilleure est la stabilité de la ligne de base, plus basse sera la limite de détection obtenue.

Avec le "Modèle 10" et des colonnes de neutralisation conventionnelles à résine, celles-ci doivent généralement être régénérées après dix à quatorze heures de fonctionnement. Une régénération correcte ne doit pas être trop rapide et doit être suivie d'un rinçage abondant des colonnes à l'eau ultrapure. Pour les cations (monovalents ou divalents), la régénération s'opère en faisant circuler une solution de soude (NaOH à 0,5 M) à 280 ml/h pendant quarante minutes, puis de l'eau ultrapure au même débit pendant une heure et demie.

Pour les anions, le régénérant utilisé est une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4 à 0,5 M) à 250 ml/h durant les mêmes laps de temps que pour les cations.

Après cette étape de régénération, nous avons observé qu'une bonne stabilisation était obtenue pour les cations après une heure, pour le chlore après quatre heures, et pour les anions nitrate et sulfate, après six heures. Dans ces conditions, nous avons obtenu une limite de détection voisine de 1 ng.g^{-1} (voir tableau n° 2).

Par la suite, nous avons monté une colonne de neutralisation à "fibres creuses" sur le "Modèle 2010 i" pour l'analyse des anions. Avec ce type de colonne, la perte de temps due à l'étape de régénération se trouve supprimée; la neutralisation de l'éluant se faisant au fur et à mesure à travers la paroi d'une fibre creuse immergée dans une enveloppe, où circule par simple gravité un liquide régénérant ($2,5 \cdot 10^{-2} \text{ N}$ de H_2SO_4) (voir figure 2 B).

En outre, l'utilisation de la colonne "à fibres creuses" permet de réduire notablement la largeur du pic de l'eau (voir figure 4c) et à condition de l'utiliser avec une colonne de préconcentration, de mesurer en une seule fois le chlore, le nitrate et le sulfate.

Deux précautions sont absolument indispensables lors de l'utilisation de ce type de colonne pour obtenir une excellente ligne de base; le régénérant doit être préparé vingt quatre heures à l'avance (permettant un dégazage et une mise à température de la salle correctes); les bulles d'air, qui se forment le long de la fibre creuse durant les périodes d'arrêt de fonctionnement du chromatographe, doivent être soigneusement éliminées.

3.4. ETALONNAGES

Pour les cations monovalents, une solution mère (Na^+ 5 mg.l^{-1} , NH_4^+ 1 mg.l^{-1} et K^+ 1 mg.l^{-1}) a été préparée par pesée (à $\pm 0,1$ mg près; Mettler H10T) à partir de solutions standard fabriquées par Orion (NaCl , NH_4Cl et KCl à 0,1M) puis ultérieurement à l'aide de solutions Titrisol NaCl , NH_4SCN et KOH 0,1N fabriquées par Merck.

Pour les anions communs (Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--}) une solution mère (Cl^- 5 mg.l^{-1} , NO_3^- 1 mg.l^{-1} et SO_4^{--} 5 mg.l^{-1}) a été préparée par pesée à partir de solutions standard fabriquées par Orion (NaCl , KNO_3 et Na_2SO_4 à 0,1M) puis ultérieurement à partir des solutions Tritisol HCl , HNO_3 et H_2SO_4 à 0,1N fabriquées par Merck.

Pour les cations divalents, nous avons préparé une solution mère (Mg^{++} à 2 mg.l^{-1} , Ca^{++} à 6 mg.l^{-1}) à partir des sels $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ et $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Pour les anions "peu retenus" (F^- , HCOO^- , CH_3COO^-) nous sommes partis de solutions d'acide fluorhydrique (à 40%, $d = 1,13$ soit 22,6 N), d'acide formique (à 98 - 100%, $d = 1,22$ soit 26N) et d'acide acétique (100%, $d = 1,06$ soit 17,5 N).

Les échantillons artificiels de concentrations variables sont alors fabriqués par dilution à la pipette de volumes variables de ces solutions mères avec de l'eau ultrapure.

Les tableaux de valeurs ainsi que les calculs statistiques détaillés sont présentés en Annexe (tableaux A 1.1., A 1.2., A 1.3., A 1.4. et A 1.5.). Nous avons reporté dans le tableau 2 les principaux résultats obtenus, les courbes d'étalonnage correspondantes sont présentées sur les figures 5 a, b, c, d et e.

Exception faite du Ca^{++} et du Mg^{++} (figure 5d), la hauteur des pics est une fonction linéaire de la concentration pour les gammes de concentration choisies (tableau 2). Les erreurs obtenues au seuil 95% de confiance représentent moins de 10% de la valeur moyenne de la gamme d'étalonnage.

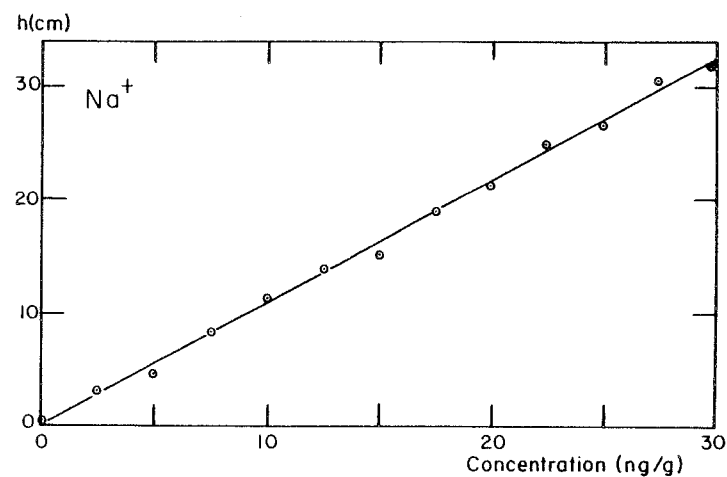
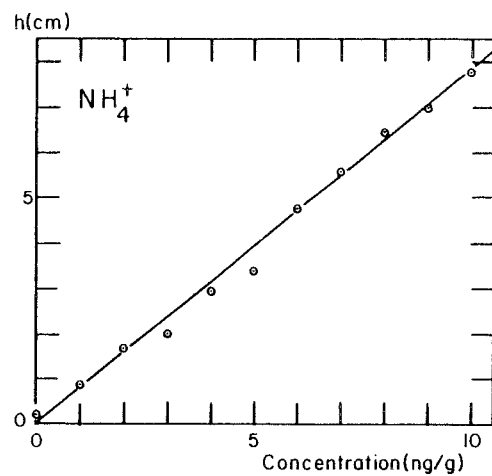


Figure 5a : Courbes d'étalonnages de l'ammonium et du sodium : la hauteur des pics (h en cm) est reportée en fonction de la concentration des solutions étalons correspondantes.

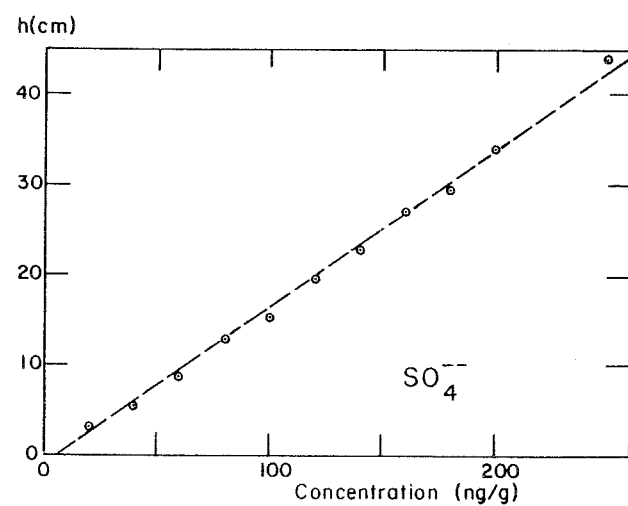
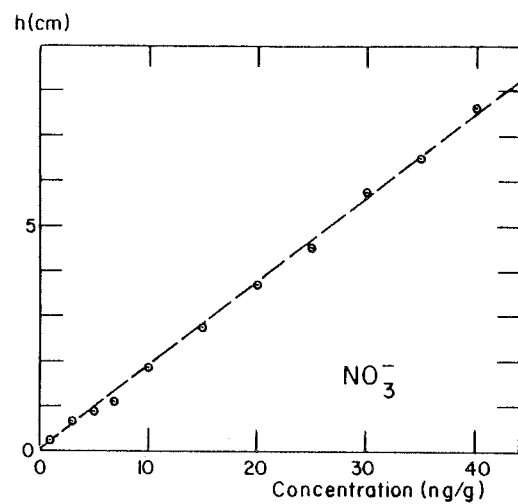


Figure 5c : Courbes d'étalonnages du nitrate et du sulfate.

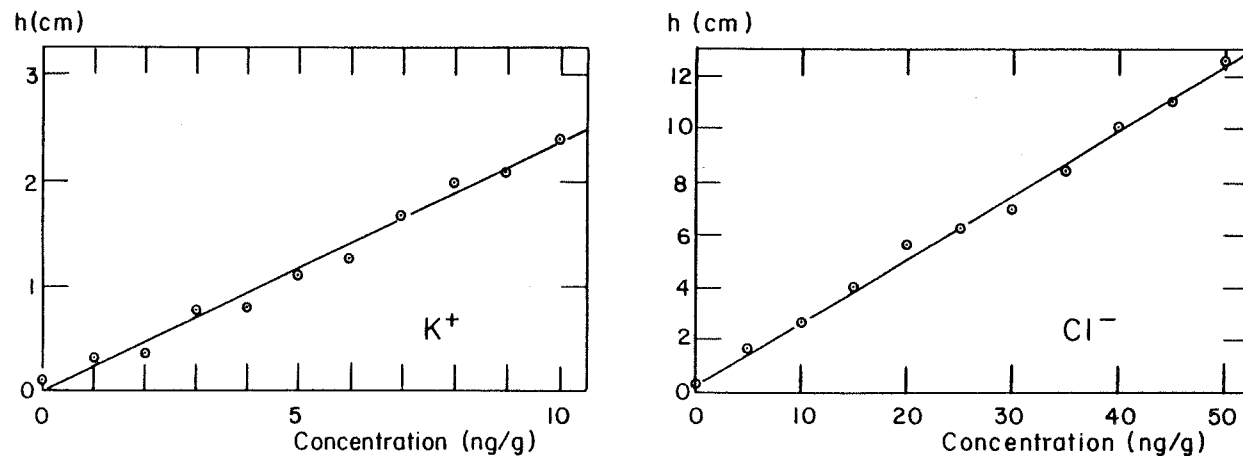


Figure 5b : Courbes d'étalonnages du potassium et du chlore.

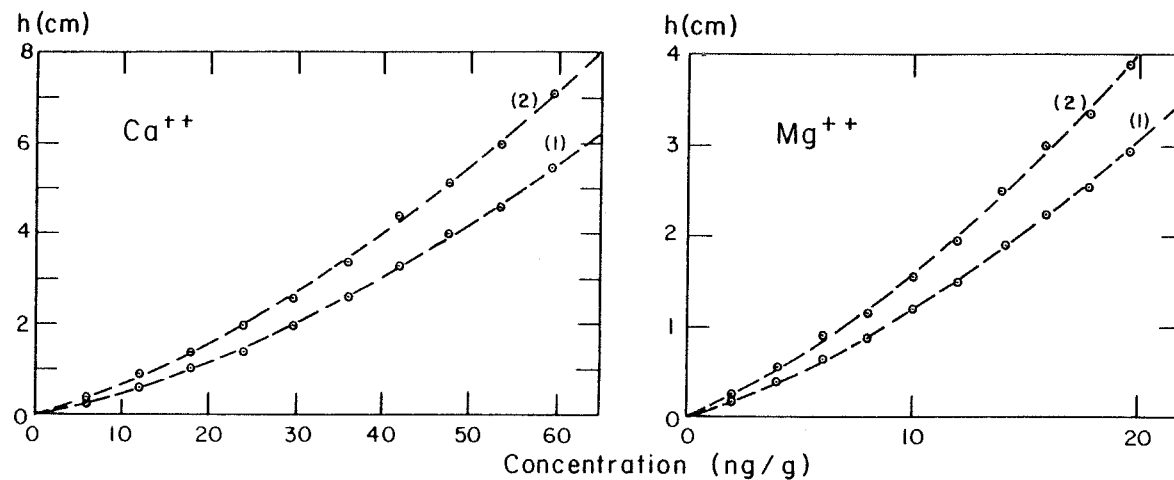


Figure 5d : Courbes d'étalonnages du calcium et du magnésium : avec une colonne de neutralisation fraîchement régénérée (1), avec une colonne de neutralisation à la limite de la saturation (2).

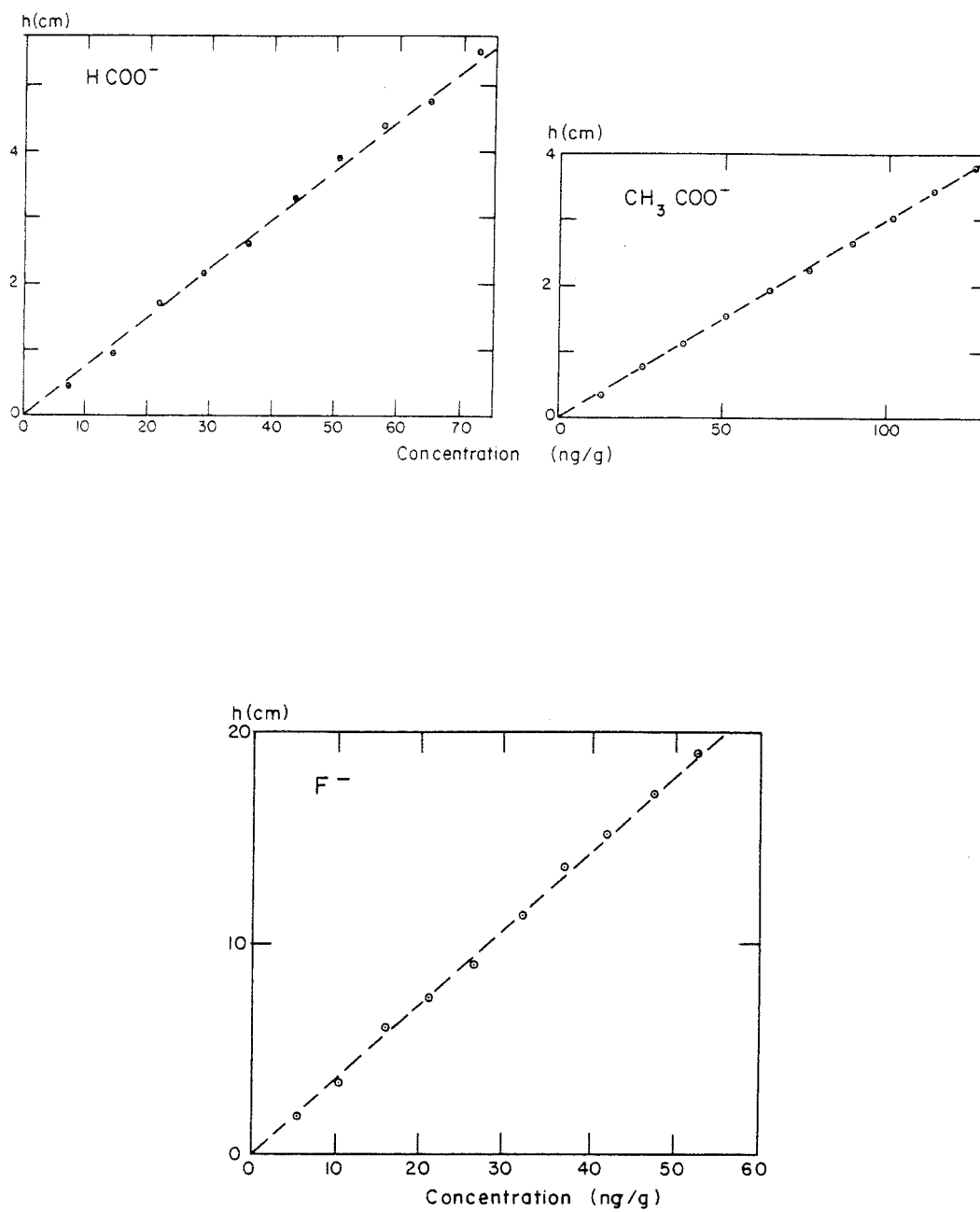


Figure 5e : Courbes d'étalonnages du formiate, de l'acétate et du fluor.

	Gamme de concentration	Régression linéaire	Erreur	Coefficient de corrélation	Limite de détection
Na ⁺	0 - 30 ng.g ⁻¹	$h = 0,13 + 1,0807 x$	$\pm 1,3 \text{ ng.g}^{-1}$	0,998	0,5 ng.g ⁻¹
NH ₄ ⁺	0 - 30 ng.g ⁻¹	$h = - 0,03 + 0,7818 x$	$\pm 0,7 \text{ ng.g}^{-1}$	0,996	0,5 ng.g ⁻¹
K ⁺	0 - 10 ng.g ⁻¹	$h = - 0,01 + 0,2354 x$	$\pm 1,1 \text{ ng.g}^{-1}$	0,992	1,0 ng.g ⁻¹
Mg ⁺⁺	0 - 20 ng.g ⁻¹	$h = 0,003 x^2 + 0,09 x$ $h = 0,004 x^2 + 0,117 x$	$\pm 1 \text{ ng.g}^{-1}$	0,990 0,980	1,0 ng.g ⁻¹
Ca ⁺⁺	0 - 60 ng.g ⁻¹	$h = 0,00095 x^2 + 0,038 x$ $h = 0,0011 x^2 + 0,057 x$	$\pm 1 \text{ ng.g}^{-1}$	0,995 0,987	1,0 ng.g ⁻¹
Cl ⁻	0 - 50 ng.g ⁻¹	$h = 0,30 + 0,2391 x$	$\pm 2,7 \text{ ng.g}^{-1}$	0,998	2,0 ng.g ⁻¹
NO ₃ ⁻	0 - 40 ng.g ⁻¹	$h = - 0,04 + 0,1885 x$	$\pm 1,2 \text{ ng.g}^{-1}$	0,999	1,0 ng.g ⁻¹
SO ₄ ⁻⁻	0 - 250 ng.g ⁻¹	$h = - 1,20 + 0,1751 x$	$\pm 11,0 \text{ ng.g}^{-1}$	0,998	2,0 ng.g ⁻¹
F ⁻	0 - 50 ng.g ⁻¹	$h = - 0,21 + 0,3646 x$	$\pm 1,8 \text{ ng.g}^{-1}$	0,998	1,0 ng.g ⁻¹
HCOO ⁻	0 - 70 ng.g ⁻¹	$h = - 0,08 + 0,0768 x$	$\pm 2,7 \text{ ng.g}^{-1}$	0,998	2,0 ng.g ⁻¹
CH ₃ COO ⁻	0 - 125 ng.g ⁻¹	$h = 0,007 + 0,03026 x$	$\pm 3,7 \text{ ng.g}^{-1}$	0,999	3,0 ng.g ⁻¹

Tableau n° 2 : Estimation de la précision d'une mesure : pour les différents ions, x représente la concentration en ng.g⁻¹ et h la hauteur des pics en cm.

Dans la pratique, il n'est évidemment pas possible de calibrer avec dix étalons à chaque série de mesures.

Pour la mesure des ions systématiquement étudiés (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--}) le passage de trois étalons en début puis à la fin d'une série d'analyse (généralement vingt échantillons) s'est révélée satisfaisante.

Pour ces ions, nous n'avons jamais constaté de variation importante de la pente d'étalonnage (<5%) au cours d'une même série d'analyses, cependant cet étalonnage doit être recommencé systématiquement après chaque arrêt de plus de deux heures de l'appareil (variation de 10 à 20% de la pente de l'étalonnage liée à des problèmes de température et d'état de colonnes).

Par contre, l'analyse du magnésium et du calcium se révèle être plus astreignante car non seulement l'étalonnage n'est pas linéaire, mais la réponse obtenue varie assez nettement (voir figure 5d) entre le début d'une série d'analyse, lorsque la colonne de neutralisation vient d'être régénérée et la fin, lorsque la colonne de neutralisation arrive à saturation. Dans ces conditions il est apparu nécessaire de passer trois étalons tous les cinq échantillons mesurés, pour une série de 20 analyses.

3.5. INTERCALIBRATION S

Les difficultés rencontrées lors de l'étalonnage du calcium et du magnésium, à savoir d'une part la non-linéarité de la réponse et la dérive de celle-ci au cours du temps, d'autre part la dissymétrie des pics qui augmente l'imprécision (figure 4a-B), nous ont incité à vérifier les résultats obtenus à l'aide de mesure d'absorption atomique. Nous avons trouvé en fait un excellent accord entre les résultats des 2 techniques analytiques portant sur une série de trente deux échantillons antarctiques (voir figure 6 et tableau A.1.6 en Annexe 1).

Nous en avons profité également pour intercalibrer les mesures de chlore par chromatographie ionique et activation neutronique sur dix-huit échantillons. Les résultats obtenus sont cohérents (figure 7).

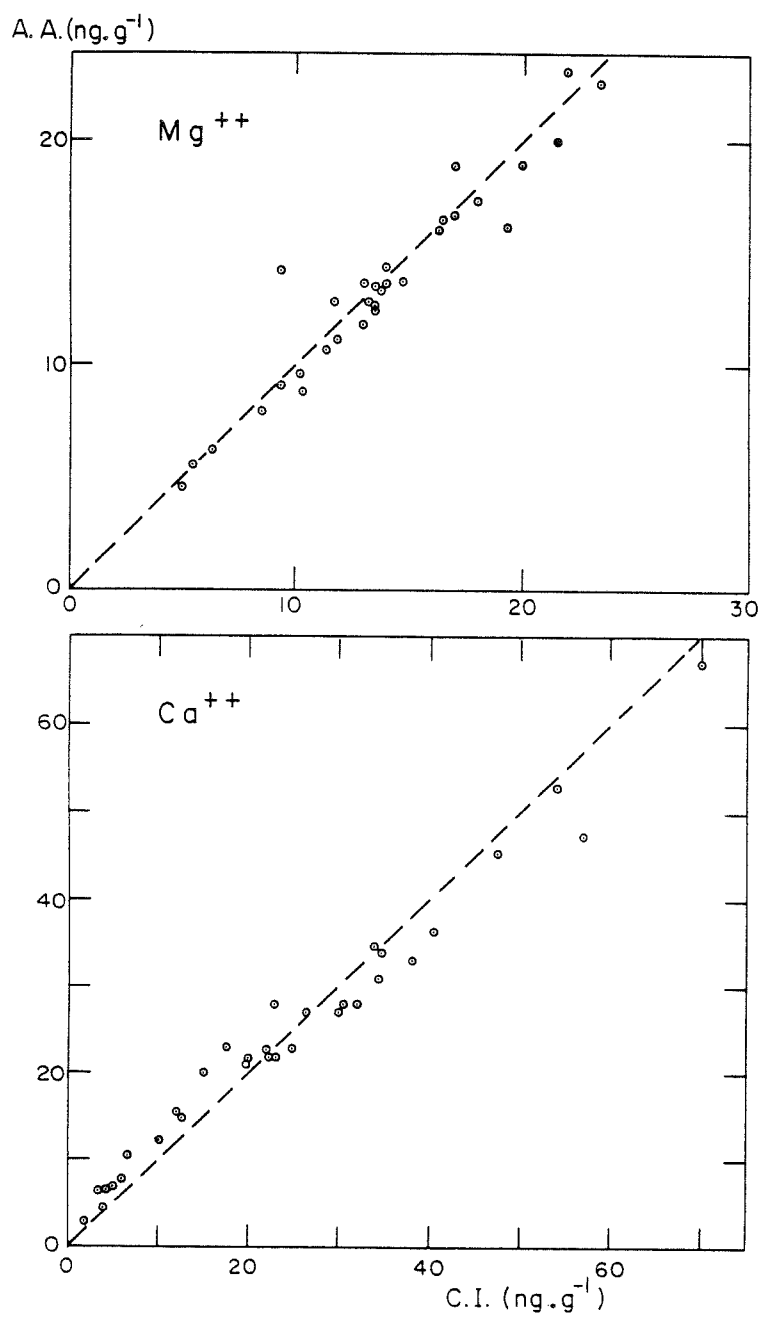


Figure 6 : Intercalibration des mesures de calcium et de magnésium par absorption atomique (A.A.) et par chromatographie ionique (C.I.).

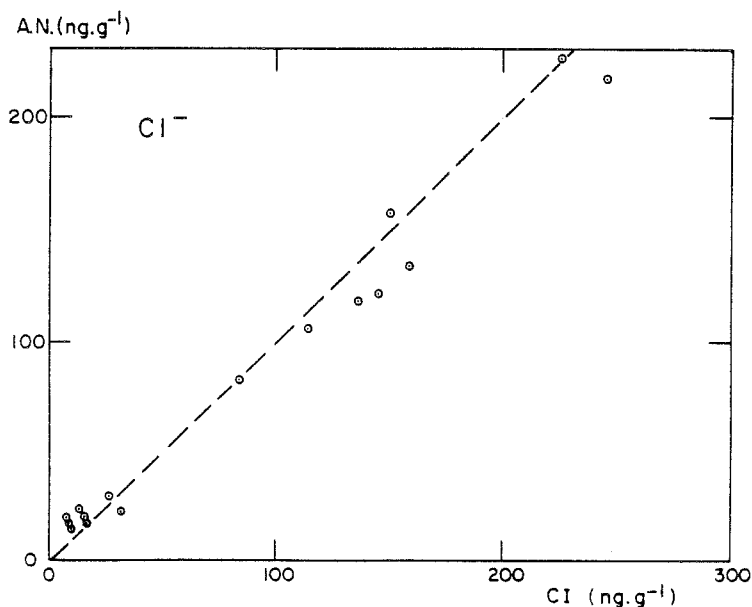


Figure 7 : Intercalibration des mesures de chlore par activation neutronique (A.N.) et par chromatographie ionique (C.I.).

3.6. COMPARAISON DE LA CHROMATOGRAPHIE IONIQUE AUX AUTRES TECHNIQUES ANALYTIQUES

Mis à part le cas des cations Na^+ et K^+ , la chromatographie ionique, à des niveaux de concentrations comparables, nécessite généralement de plus faibles quantités d'échantillons que les autres techniques analytiques (un ordre de grandeur pour les composés de l'azote, deux ordres de grandeur pour le sulfate) (voir tableau 3).

Le gros avantage de la chromatographie ionique est d'être une analyse multiélémentaire; elle permet ainsi de mesurer six ions sur le même échantillon avec seulement onze millilitres d'eau de fusion. D'autre part, la manipulation de l'échantillon est extrêmement simple et rapide (prélèvement avec une seringue puis injection immédiate) ce qui minimise les risques de contaminations pendant l'analyse proprement dite par rapport à d'autres techniques (en particulier l'ionométrie par électrodes spécifiques).

Elément	Na ⁺			K ⁺			NH ₄ ⁺	
Méthode Analytique	Absorption atomique (A.A.)	Activation Neutronique (A.N.)	Chromatographie ionique (C.I.)	A.A.	C.I.	Phénol-hypochlorite	Electrode spécifique (E.S.)	C.I.
Volume minimum nécessaire	50 µl	30 ml	6 ml *	50 µl	6 ml *	non donné	non donné	6 ml *
Précision	5 - 15 % 20-250 ng.g ⁻¹	2 - 5 % 0-150ng.g ⁻¹	9 % 0-15ng.g ⁻¹	5 à 15% 2-15ng.g ⁻¹	22 % 0 - 5ng.g ⁻¹	non donnée	non donnée	14 %
Références	Warburton et al.1981	Legrand et al. 1984	ce travail	Warburton et al.1981	ce travail	Parker et al. 1977	Busenberg et Langway,1979	ce travail

Elément	Cl ⁻		NO ₃ ⁻			SO ₄ ⁻⁻	
Méthode Analytique	A.N.	C.I.	Cadmium réduction + diazotation	Spectroscopie U.V.	C.I.	Préconcentration + E.S.	C.I.
Volume minimum nécessaire	30 ml	1.5 ml 5 ml *	25 ml	20 ml	5 ml *	600 à 1000 ml	5 ml *
Précision	8 à 13 % 0-200 ng.g ⁻¹	11 % 0-25ng.g ⁻¹	non donnée	2 % 0 - 50 ng.g ⁻¹	6 % 0 - 20 ng.g ⁻¹	10 % 0 - 70 ng.g ⁻¹	9 % à 125 ng.g ⁻¹
Références	Legrand et al. 1984	ce travail	Parker et al. 1981	Parker et al. 1981	ce travail	Delmas 1978	ce travail

Tableau n° 3 : Comparaison de différentes techniques analytiques utilisées pour la mesure des ions dans la précipitation polaire. Les volumes notés avec un astérisque, pour la chromatographie ionique, rappellent qu'en fait il s'agit du volume total utilisé pour l'analyse de tous les cations, respectivement de tous les anions.

4 - LES CONTAMINATIONS

Au moment où nous avons débuté ce travail, nous étions sensibilisés aux problèmes des contaminations par les récents travaux de C.Boutron (Boutron 1978, Boutron 1979) qui avait adapté l'absorption atomique à l'étude de certains éléments traces dans la neige (non seulement les métaux tels que Cu, Zn... mais aussi les alcalins et alcalino-terreux Na, K, Mg et Ca).

Le protocole expérimental établi pour ces analyses (nettoyage du matériel aux acides concentrés, limitation du domaine d'analyse aux seuls échantillons de neige de surface) ne convenait pas pour aborder de manière satisfaisante notre étude.

A l'inverse, nous disposions des résultats d'autres études concernant les composés de l'azote (NO_3^- et NH_4^+ , Wilson et al., 1978) dans une carotte profonde mais le manque de tests de validité des mesures rendait ces résultats suspects.

Il nous est apparu indispensable, pour mener à bien notre étude, de circonscrire les problèmes de contamination au cas par cas, pour chacun des éléments étudiés et de tenter de réaliser des mesures correctes non seulement sur des échantillons de neige de surface mais aussi sur des carottes de névé et de glace.

4.1. NETTOYAGE DU MATERIEL

Les échantillons de neige prélevés à partir de puits creusés dans la neige ont été conservés soit dans de petits récipients en polystyrène cristal de 25 ml (les "Accuvettes") pré-nettoyés et commercialisés par "Coulter", soit dans de la gaine plastique propre "garantie traitée en salle blanche" (gaine S.N.D.I.).

Les échantillons obtenus à partir de carottes de névé ou de glace sont transférés, après fusion, dans des flacons de 60 ml en polyéthylène. Ces flacons du commerce nécessitent le conditionnement suivant :

- lavage au savon (élimination des corps gras) puis rinçage abondant à l'eau du robinet,

- rinçage avec une "eau primaire" (résistivité de 10-15 M Ω obtenue par désionisation sur résine de type A₂, commercialisée par S.A.G.E.I.) puis stockage pendant vingt quatre heures dans l'eau sous hotte sans poussière,
- rinçage avec une "eau secondaire" (résistivité 18 M Ω obtenue par désionisation sur résine Millipore de l'eau primaire) puis avec cette eau passage cinq à dix minutes au four à microondes,
- rinçage puis stockage avec l'eau secondaire pendant vingt quatre heures,
- rinçage, séchage puis emballage sous double gaine polyéthylène.

Moyennant ce conditionnement, les valeurs de "blanc" de ces flacons ont toujours été inférieures aux limites de détection pour tous les éléments mesurés.

Le même processus de lavage a été appliqué pour les différents outils (scie en plexiglas, gants en caoutchouc, boîte en plexiglas du dispositif de recarottage du névé,...) mis en contact direct avec les échantillons.

Par contre, le corps du carottier en téflon P.T.F.E. (voir paragraphe 4.3.2.), qui initialement était prévu pour le conditionnement des carottes de névé en vue d'une analyse des métaux, avait été immergé dans un bain d'acide fluorhydrique concentré. L'élimination ultérieure des traces d'acide par rinçage à l'eau ultrapure s'est révélée infiniment plus délicate que prévu; en effet, après près de vingt cycles "passage au four à microondes et stockage durant vingt quatre heures dans l'eau ultrapure", le carottier continuait de désorber des quantités non négligeables (près de 1 μ Eq par litre d'eau) d'acide fluorhydrique. Par la suite, nous avons donc définitivement proscrit toute tentative de lavage du matériel avec des acides concentrés (en particulier le téflon, véritable "éponge" pour les acides).

4.2. CONTAMINATION PAR LES GAZ AMBIANTS

Plusieurs tests expérimentaux ont clairement montré que la mesure de l'ammonium en particulier pouvait être erronée si un certain nombre de précautions n'était pas respecté.

Tout d'abord, une série d'accuvettes remplie d'eau ultrapure a été laissée ouverte dans une hotte sans poussière pendant une période de temps variable (5 à 520 minutes), puis analysée en ammonium. Les résultats obtenus (figure 8, tableau A-1.7) montrent que la concentration atteint près de 50 ng.g^{-1} en moins de neuf heures, alors que la mesure effectuée sur l'eau d'une "accuvette" laissée fermée durant le même laps de temps ne révèle pas d'augmentation significative.

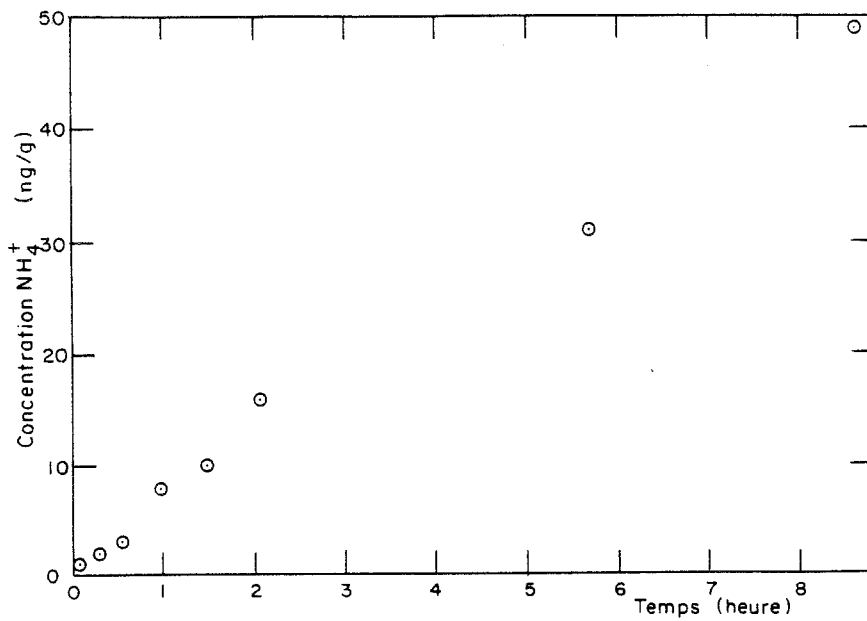


Figure 8 : Evolution de la teneur en ammonium au cours du temps dans une solution laissée à l'air libre, dans une hotte sans "poussière".

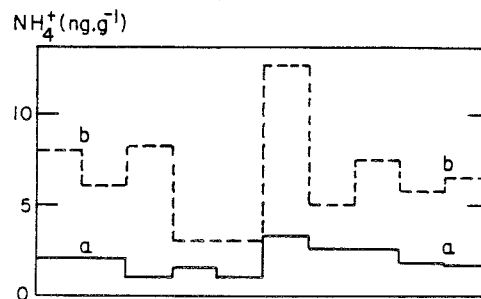


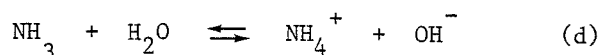
Figure 9 : Teneur en ammonium de deux séries d'échantillons de neige collectées côte à côte; la série (b) ayant subi une fusion accidentelle.

Le résultat de l'analyse de deux séries d'échantillons collectés côte à côte dans un puits à la station Pôle Sud est révélateur. Tous les échantillons ont été collectés en accuvettes et transportés gelés sous gaine soudée de l'Antarctique à Grenoble ; la série (b) qui a subi une fusion accidentelle montre une nette augmentation de la teneur en ammonium (figure 9 et tableau A.1.8).

Lors de l'étude d'un forage profond (950 m à Vostok) dix huit morceaux de carotte de glace ont été décontaminés par lavage (voir paragraphe 4.3.) puis mis dans des flacons en polyéthylène de 500 ml. Une première série d'aliquots d'eau de fusion a été prélevée puis mesurée (voir figure 10), les flacons de 500 ml étant regelés. Par la suite nous avons mesuré à nouveau certains de ces échantillons en effectuant un nouveau prélèvement dans les flacons initiaux. Nous pouvons observer (figure 10 et tableau A.1.9) une augmentation systématique des teneurs lors de la deuxième et de la troisième mesure, et ceci d'une manière d'autant plus nette qu'il restait peu de liquide dans le flacon de 500 ml.

Ce type de contamination a par ailleurs été mis en évidence par d'autres auteurs, ainsi Hayes et al. 1980 montrent que les particules d'acide sulfurique récoltées sur des filtres dans la stratosphère sont neutralisées par l'ammoniac (NH_3), présent à l'état de trace dans l'atmosphère du laboratoire (ces particules se convertissant en sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$).

L'ensemble de nos observations met donc en évidence une contamination par dissolution de trace d'ammoniac de l'atmosphère dans l'eau de fusion :



Afin de minimiser ce problème, plusieurs précautions doivent être prises. L'établissement du bilan ionique nécessitant quatre mesures distinctes (Cl^- ; NO_3^- et SO_4^{--} ; Na^+ , NH_4^+ et K^+ ; H^+), il est indispensable de commencer par l'analyse des cations, ce qui permet de mesurer l'ammonium dès la première fusion de l'échantillon. Dans la mesure du possible, nous utiliserons des flacons dont le volume n'est pas trop grand par rapport au volume d'échantillon, afin de diminuer au maximum le volume d'air emprisonné.

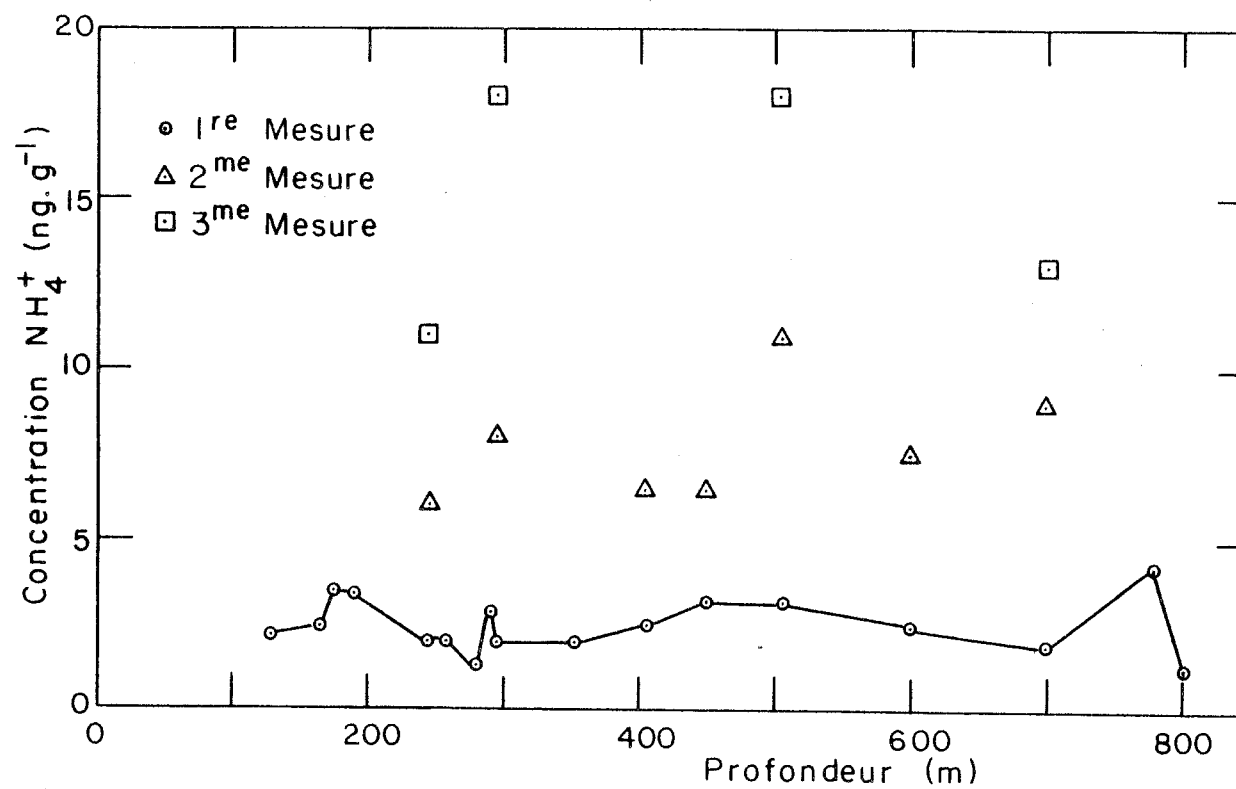
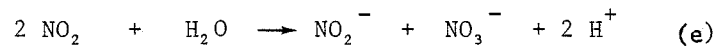


Figure 10 : Mesures successives de la teneur en ammonium effectuées sur des échantillons de glace antarctique.

Un autre type de contamination a été constaté à la suite d'une fuite accidentelle de liquide réfrigérant utilisé dans le circuit de refroidissement des chambres froides (le chlorure de méthyle, CH_3Cl). En effet, après cet incident, nous avons constaté un très important signal de chlore par activation neutronique pour les échantillons conservés en chambre froide, ce signal non détecté par chromatographie ionique, mettant en évidence la nature moléculaire de ce chlore.

Quelques cas de contamination par les nitrites (NO_2^-) ont également parfois été mis en évidence, probablement par suite de la dissolution du dioxyde d'azote (NO_2) présent à l'état de trace dans l'atmosphère (cette contamination restant toutefois beaucoup plus limitée que pour l'ammonium) :



Enfin signalons qu'au cours d'une mise en oeuvre temporaire de ces analyses dans un local situé dans le centre de ville de Grenoble, nous avons, en plus des contaminations précédentes, mis en évidence une rapide contamination des échantillons par le fluor, le brome et le sulfate.

4.3. CONTAMINATION AU NIVEAU DU PRELEVEMENT

Dans ce paragraphe, nous détaillons et comparons les différentes méthodes possibles pour prélever des échantillons de névé ou de glace avec le minimum de contamination et pour éventuellement effectuer un ré-échantillonnage (ou recarottage) juste avant l'analyse .

4.3.1. Les puits glaciologiques

L'échantillonnage de la neige en flacons (type "Accuvettes") ou gaine (S.N.D.I.) à l'aide d'une petite plaque en téflon (ou en acier inoxydable) sur les parois d'un puits est une opération délicate et physiquement éprouvante. Cependant, cette méthode donne de bons résultats (concentrations obtenues pour les "blancs" inférieures aux limites de détection) pourvu que certaines conditions soient respectées au cours du prélèvement (opérateurs munis de vêtements et gants stériles, port du masque, fermeture immédiate de l'accuvette ou soudure de la gaine contenant l'échantillon).

Ce type de prélèvement représente l'idéal au-dessus de trois mètres du fait de la fragilité des carottes obtenues par forage à cette profondeur.

Le creusement et l'échantillonnage d'un puits, au-delà de cette profondeur, est une tâche beaucoup plus longue et délicate du fait de la densification de la neige et est, par là même, une source potentielle de contaminations.

4.3.2. Traitement des carottes de névé

Au-delà de dix mètres (ce qui représente environ un siècle dans les régions centrales de l'Antarctique), le creusement d'un puits devient très difficile, rendant le forage nécessaire.

D'une série de tests portant sur de nombreux éléments (Na, Mg, K, Ca, Fe, Al, Mn, Cd, Pb, Cu, Zn et Ag), Boutron (1978), conclut que l'utilisation de carottiers métalliques même pré-nettoyés, ne permet pas d'obtenir des échantillons corrects. Il préconise l'utilisation d'un carottier en polycarbonate, aisément nettoyable (le Makrolon). L'utilisation de ce type de carottier en 1979 au Dôme C (Antarctique Centrale) a démontré qu'il était effectivement possible de prélever sans contaminer des carottes mais guère au-delà de 12 à 15 mètres.

Pour éliminer la partie extérieure nécessairement contaminée des carottes, nous avons mis en oeuvre deux méthodes. La première consiste simplement à éliminer la partie externe de la carotte à l'aide d'une scie téflonnée, l'opérateur étant muni de gants propres et d'un masque. La seconde méthode consiste à découper la carotte perpendiculairement à son axe avec une scie téflonnée, de gratter les deux faces ainsi obtenues en s'aidant d'une plaque affûtée en inox puis de recarotter l'échantillon à l'aide d'un petit carottier en téflon P.T.F.E. (figure 11). Pour ces deux méthodes, il est nécessaire d'opérer à une température inférieure à -15°C sinon les traces de fusion apparaissent très vite sur les gants propres de l'opérateur et le risque de contamination devient important.

Afin de tester l'efficacité de ces deux méthodes, trois séries de prélèvements ont été effectués au Dôme C entre 2,30 et 2,80 m de profondeur; une série prélevée directement en "accuvettes" sur les parois d'un puits, une série de carottes provenant de deux forages effectués côte à côte (distants de 30 cm) à un kilomètre du premier prélèvement. Les trois profils obtenus, pour les sept ions étudiés, sont reportés sur la figure 12. Les concentrations

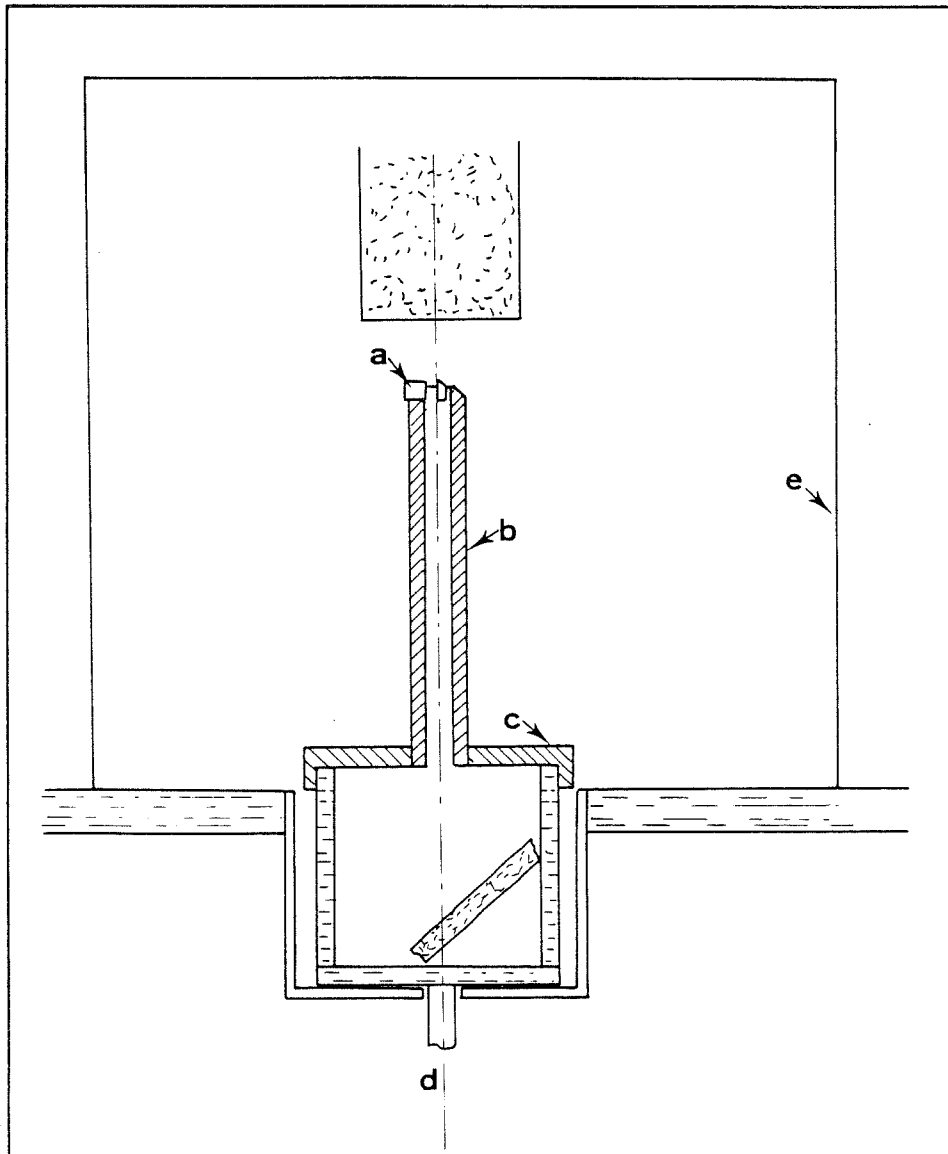


Figure 11 : Dispositif utilisé pour le recarottage du névé :

- (a) dents en molybdène
- (b) tube carottier en téflon P.T.F.E.
- (c) réservoir en plexiglas
- (d) moto-réducteur
- (e) enceinte dépoussiérée

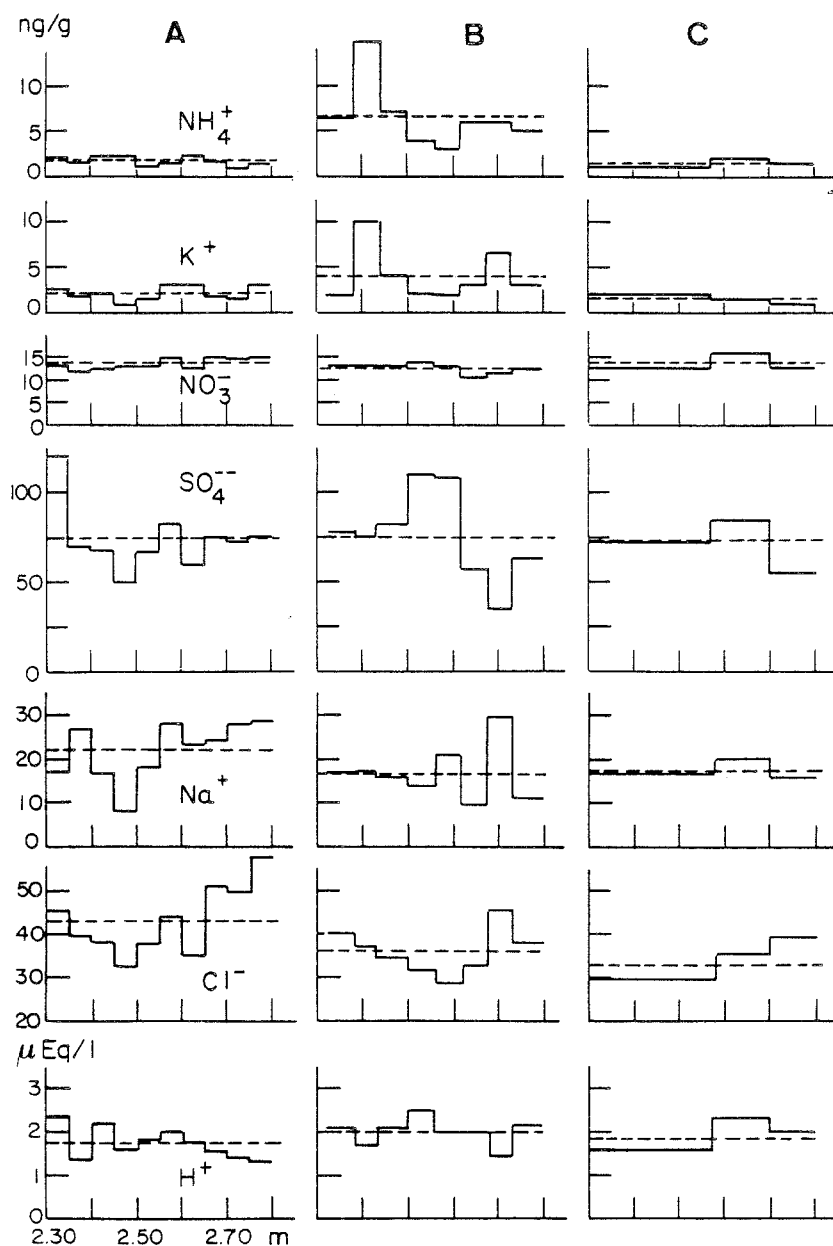


Figure 12 : Comparaison de trois types de prélèvements effectués sur les couches de neige déposées entre 2,30 et 2,80 mètres de profondeur au Dôme C :

- (A) échantillons collectés dans un puits,
- (B) carottes de névé décontaminées à la scie téflonnée,
- (C) carottes de névé décontaminées avec le dispositif présenté en figure 11.

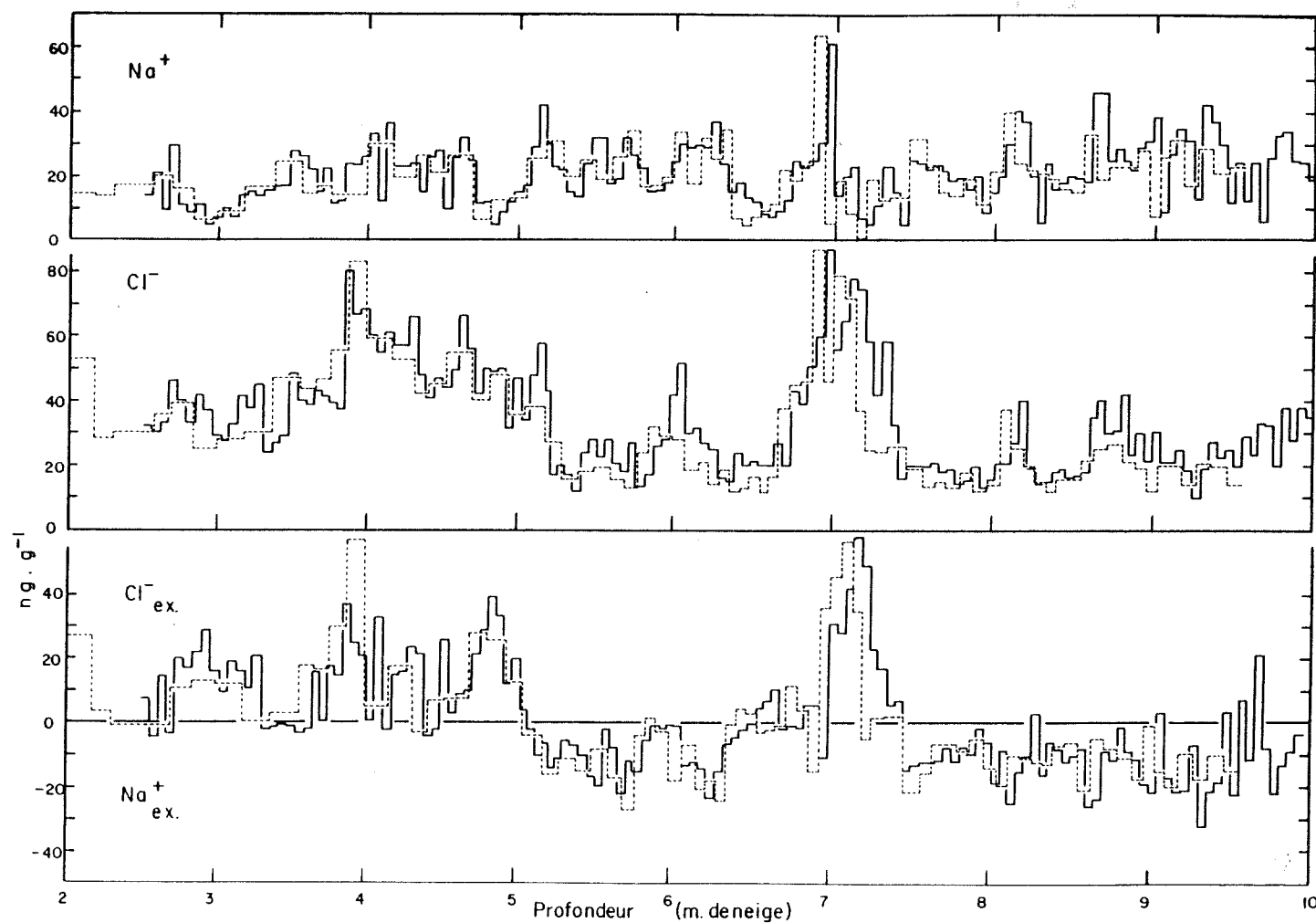


Figure 13 : Profils de sodium, chlore et excès de chlore (ou excès de sodium) obtenus sur deux séries de carottes entre 2,50 et 10,00 m. au Dôme C : la première série a été recarottée (courbe en trait plein), la seconde redécoupée à la scie téflonnée (courbe en pointillé).

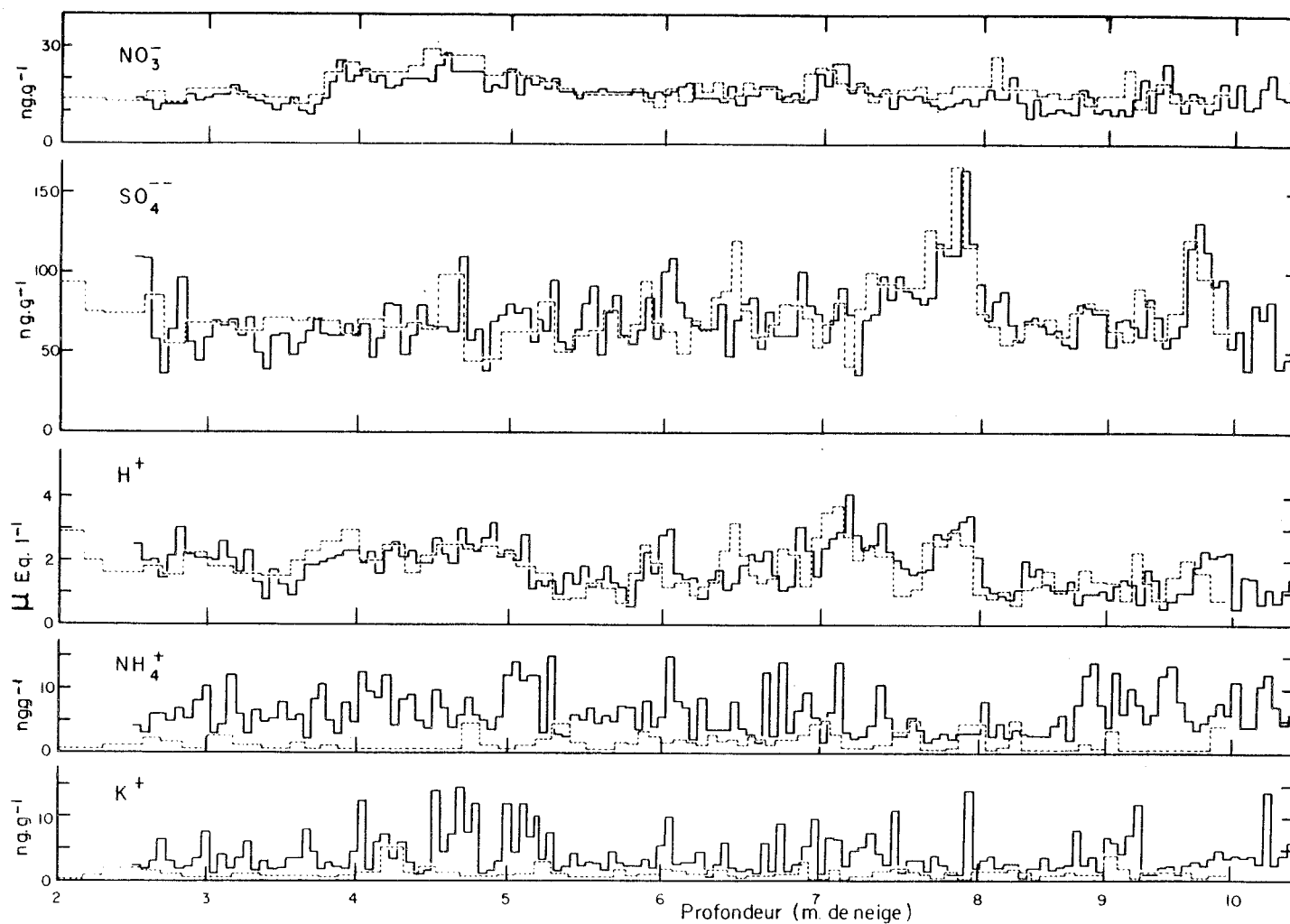


Figure 14 : Profils de nitrate, sulfate, acidité, ammonium et potassium mesurés sur deux séries de carottes entre 2,50 et 10,00 m. de profondeur au Dôme C : la première série a été recarottée (courbe en trait plein), la seconde a été redécoupée à la scie téflonnée (courbe en pointillé).

que nous avons obtenues sur les carottes (figure 12 B et C) pour Na^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{--} et H^+ sont en bon accord avec les valeurs du puits (figure 12 A) que nous considérons comme référence.

Cependant, pour les ions NH_4^+ et K^+ , le redécoupage de l'échantillon à la scie téflonnée ne semble pas convenir, probablement du fait d'un entraînement des éléments contaminants de l'extérieur vers l'intérieur de la carotte (cet effet devenant très gênant pour les éléments les moins concentrés). Par ailleurs, la comparaison entre les deux méthodes de traitement du névé a pu être poursuivie entre 2,80 et 10 m de profondeur. Pour les ions Na^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{--} et H^+ , les deux profils concordent remarquablement bien (figures 13 et 14).

Nous avons donc conclu que la technique utilisant le petit carottier en téflon est idéale pour traiter le névé, tout au moins jusqu'à trente mètres de profondeur pour les régions centrales; en effet, au-delà de cette profondeur, le névé devient trop dense et les manipulations longues et pénibles. Il est alors plus pratique d'utiliser un carottier en acier inoxydable. Notons d'ailleurs que ce type de carottier est indispensable pour traiter la neige des régions côtières qui, elle, contient souvent de nombreuses strates de glace dès les premiers mètres.

4.3.3. Traitement des carottes de glace

Les méthodes précédemment décrites ne conviennent évidemment plus pour les carottes de glace et il est alors nécessaire, soit de recarotter à l'aide d'une sonde thermique, en faisant fondre l'intérieur de la carotte par une résistance chauffante (figure 15), soit d'effectuer un lavage à l'eau ultrapure à 20°C environ qui élimine l'extérieur de la carotte.

L'efficacité du rinçage à l'eau ultrapure a été testée sur un morceau de glace fracturée provenant de la carotte de 906 m du Dôme C (échantillon à 359 m). L'échantillon est mis à fondre dans un entonnoir en plastique, sous une hotte sans poussière. Après avoir récolté vingt millilitres d'eau de fusion, le morceau de glace restant est rincé à l'eau ultrapure puis redéposé dans un nouvel entonnoir. Cette opération est renouvelée jusqu'à fusion totale de l'échantillon. L'ensemble de cette manipulation est réalisé en chambre sans poussière par un opérateur muni de gants propres changés fréquemment.

Le résultat des mesures effectuées sur les six fractions ainsi obtenues montrent clairement (figure 16 et tableau A.1.10) une très importante contamination de l'extérieur de la carotte, contamination semble-t-il moins nette pour le nitrate et l'ammonium que pour les autres éléments. Les concentrations de Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{--} et H^+ décroissent très rapidement de l'extérieur vers l'intérieur de la carotte, la partie centrale (c'est-à-dire lorsque le pourcentage du volume fondu, % Vf, devient inférieur à environ 50%), ne semblant plus contaminée. Par ailleurs, nous retrouvons bien le problème de la contamination par les gaz traces, évoqués au paragraphe 4.2. sur les profils de NO_3^- , NO_2^- et NH_4^+ ; seule la dernière fraction, qui n'a pas été exposée longtemps à l'air, mais mise à fondre directement dans un flacon fermé, semble libre de cet effet.

Cette étude montre donc qu'il est possible de décontaminer des carottes de glace, même fortement fracturées, mais au prix de l'élimination par lavage de 50% du volume.

Lorsque l'étude de fines couches de glace (inférieures à un centimètre d'épaisseur) est nécessaire, par exemple pour mettre en évidence des variations saisonnières ou des retombées d'origine volcanique, le lavage à l'eau ultrapure n'est plus praticable. Dans ce cas, il faut utiliser une sonde thermique (figure 15) qui permet de fondre l'intérieur de la carotte. Ce dispositif a été testé sur des carottes artificielles (fabriquées en faisant geler de l'eau ultrapure dans une gaine pré-nettoyée) et a donné d'excellents résultats pour les ions étudiés.

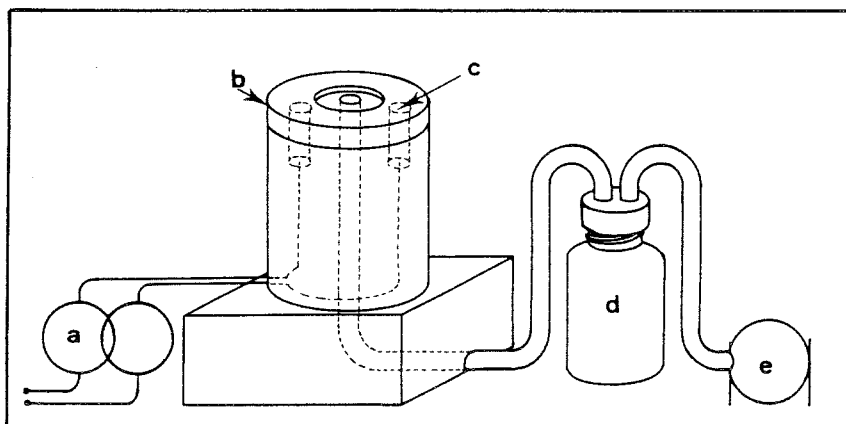


Figure 15 : Sonde thermique utilisée pour le carottage des carottes de glace:
 (a) variac, (b) tête en acier inox, (c) résistance chauffante,
 (d) flacon en polyéthylène destiné à recueillir l'eau de fusion,
 (e) pompe.

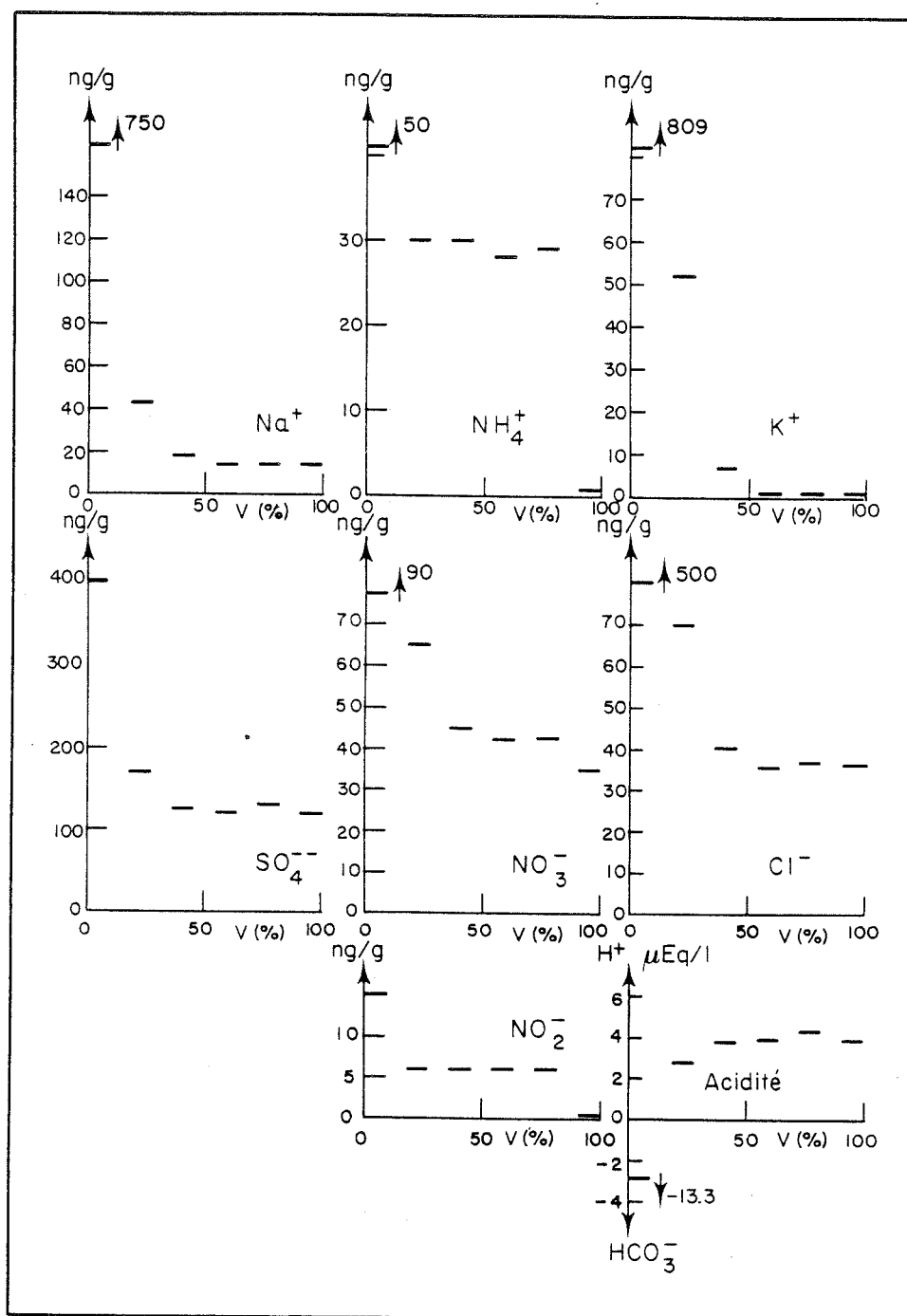


Figure 16 : Décontamination d'un morceau de glace (359 m au Dôme C) par "fusion-lavage" à l'eau ultrapure.

	Surface	3 mètres	10 mètres	30 mètres	100 mètres	4000 mètres
Puits	<u>recommandée</u>	pénible	impossible	impossible	impossible	impossible
Recarottage à sec (Carottier en P.T.F.E.)	difficile (carotte fragile)	<u>recommandée</u>	<u>recommandée</u> mais lent au-delà de 15 m.	impossible	impossible	impossible
Recarottage à sec (Carottier en acier inox)	impossible (carotte fragile)	possible mais difficile (éclatement de la carotte)	<u>recommandée</u> pour neige des régions côtières	<u>recommandée</u>	impossible	impossible
Recarottage ther- mique	impossible	impossible	impossible	risque important de contamination	<u>recommandée</u> pour des découpages fins	impossible
Fusion-lavage	impossible	impossible	impossible	impossible	<u>recommandée</u> pour l'ob- tention de valeurs moyennes	impossible

Tableau 4 : Les différentes possibilités d'obtention d'échantillons non contaminés, en fonction de la gamme de profondeur considérée.

4.3.4. Conclusions

Cette étude nous permet de conclure qu'il est souvent possible de rééchantillonner des échantillons de névé ou de glace qui sont nécessairement contaminés extérieurement lors du prélèvement. La comparaison des différentes techniques de prélèvements sur le terrain et des différentes méthodes de rééchantillonnages sont résumées et appréciées dans le tableau 4 en tenant compte de la faisabilité et des résultats obtenus.

Notons toutefois que ces conclusions optimistes ne concernent que les ions étudiés dans ce travail et qu'il serait évidemment nécessaire de refaire l'ensemble de ces tests de validité des mesures pour des études concernant d'autres éléments (par exemple, la détermination des composés organiques dans les carottes de névé nécessitera probablement des précautions très spécifiques).

C H A P I T R E 2

SITES ET TECHNIQUES DE PRELEVEMENT

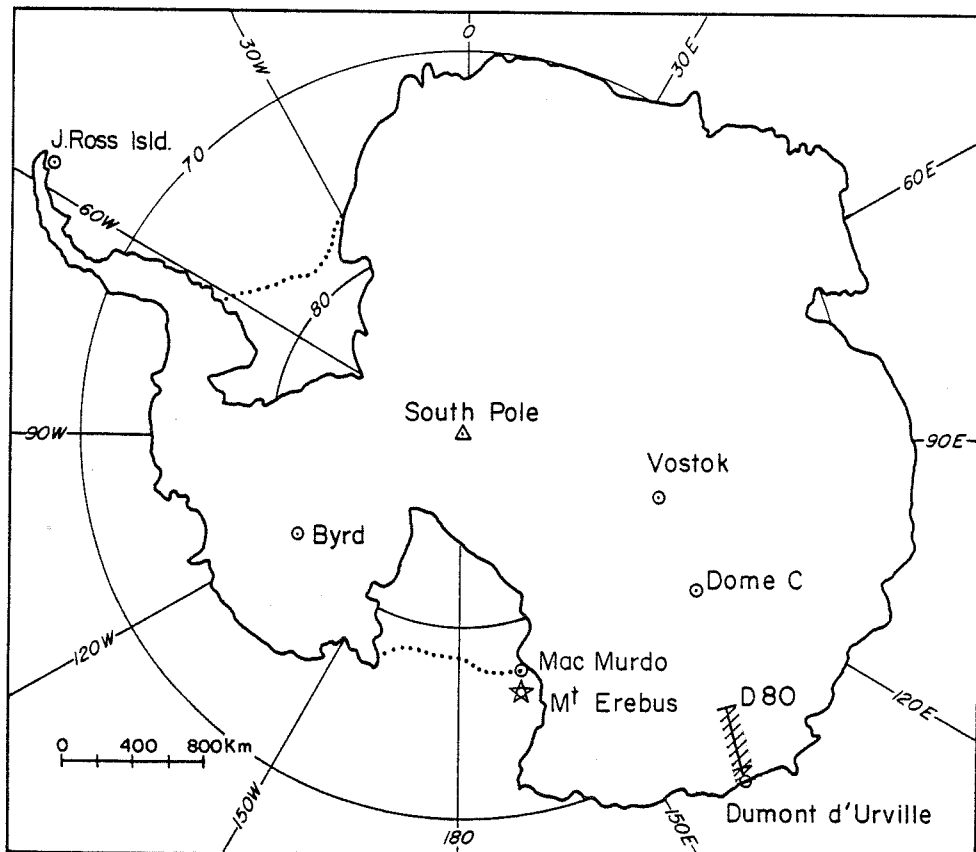
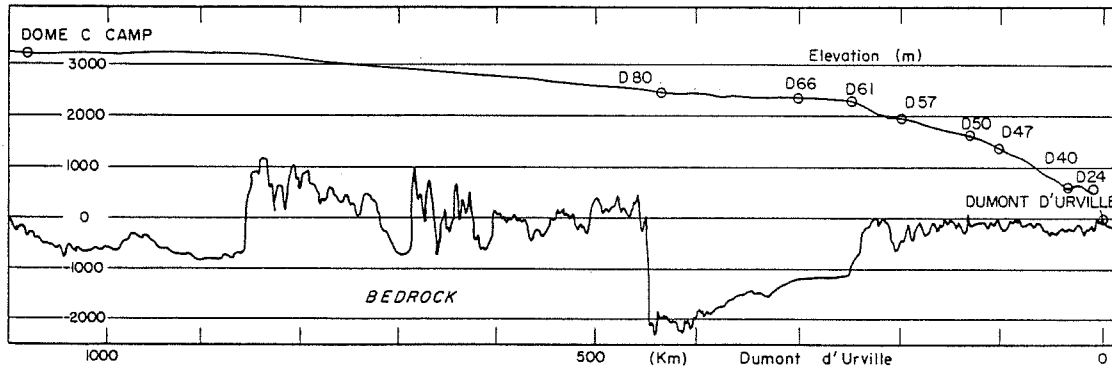


Figure 17 : Antarctique : sites de prélèvement.

Près de huit mille mesures ont été réalisées sur un millier d'échantillons de neige et de glace provenant de l'Antarctique de l'Ouest (Byrd), de l'Antarctique central (Pôle Sud) et de l'Antarctique de l'Est (Dôme C, Vostok et quelques sites de la Terre Adélie). Les échelles de temps que nous avons étudiées vont de quelques années à quelques dizaines de milliers d'années. La répartition spatiotemporelle couverte par nos échantillons est résumée dans le tableau 5 (voir carte de l'Antarctique, figure 17).

1 - PRELEVEMENTS DE SURFACE SUR L'AXE DUMONT D'URVILLE - DÔME C

Au cours de la campagne 1982-83, dix-sept échantillons de surface ont été prélevés en seize sites différents, le long des 430 premiers kilomètres de l'axe Dumont d'Urville - Dôme C.

Les échantillons ont été collectés en enfonçant verticalement dans la neige, sur une profondeur de 40 cm, des tubes en téflon P.T.F.E. préalablement nettoyés au laboratoire et transportés sous double gaine scellée. Ces échantillons représentent une période de temps allant d'une fraction d'année dans les sites les plus côtiers à deux années dans les sites comme D 55, Michel POURCHET, communication personnelle.

2 - PRELEVEMENTS DE NEIGE COUVRANT LES VINGT CINQ DERNIERES ANNEES

2.1. LE DÔME C

Au cours de la campagne 1979-80, deux puits distants de deux kilomètres environ ont été creusés au Dôme C.

La datation des couches de neige dans ces deux puits a été obtenue par mesure de la radioactivité globale β et identification des deux horizons

repères radioactifs; l'horizon 1955 qui correspond aux premières retombées radioactives artificielles, l'horizon 1965 qui correspond à une série de tests de forte puissance (Picciotto and Wilgain, 1963).

Le premier puits (Puits n° 1) a été échantillonné tous les cinq centimètres environ (soit deux échantillons par an) entre la surface et 2,50 m de profondeur, à l'aide d'une plaque en acier inoxydable affûtée et de flacons type "Accuvettes" (opérateur muni de vêtements et gants propres, portant un masque).

Un deuxième puits (Puits n° 2), distant du précédent d'environ deux kilomètres, a été échantillonné tous les centimètres environ entre la surface et 1,75 m de profondeur, puis tous les cinq centimètres entre 1,75 m et 2,80 m (soit 110 échantillons).

L'étude des profils de radioactivité β dans ces deux puits a permis d'attribuer les dates suivantes (surface: janvier 1980) : janvier 1965 à 1,63 m dans le puits n° 1 et 1,55 m dans le puits n° 2; janvier 1955 à 2,25 m dans le puits n° 1 et 2,40 m dans le puits n° 2 (Pinglot et Pourchet 1981, Michel Pourchet, communication personnelle).

2.2. LE POLE SUD

Au cours de la campagne 1977-78, un puits de dix mètres de profondeur creusé dans le secteur propre (à cinq kilomètres de la base) a été échantillonné à l'aide d' "Accuvettes" tous les deux centimètres (soit environ dix échantillons par an).

Nous avons étudié deux séquences de prélèvements; cent échantillons couvrant la période janvier 1960- janvier 1970, cinquante échantillons couvrant la période janvier 1949-janvier 1954. Dans ce puits, la datation année par année des couches de neige a été obtenue par diverses méthodes : profil de radioactivité globale β , variations saisonnières de la teneur en deutérium ou en tritium, interprétation stratigraphique (Jouzel et al. 1979).

2.3. LA BALISE D 55

Au cours de la campagne 1980-81, un puits a été échantillonné entre la surface et cinq mètres de profondeur tous les centimètres avec une plaque en acier inoxydable, les échantillons étant ici transférés dans de la gaine propre "S.N.D.I.". Nous avons pu constater, après retour de ces échantillons en France que la soudure des gaines n'avait pas été effectuée de manière correcte.

Par la suite, nous avons regroupé les échantillons deux par deux, la définition de l'échantillonnage étant alors de dix échantillons par an. Notre étude a porté sur soixante dix échantillons allant de 2,25 m à 3,75 m couvrant ainsi la période janvier 1959-janvier 1969. (datation obtenue par mesure de la radioactivité globale β : surface : janvier 1981; 3,15 m : janvier 1965; 4,08 m : janvier 1955), (Michel Pourchet, communication personnelle).

2.4. LA BALISE D 80

Un forage de quinze mètres effectué au cours de la campagne 1982-83 a été échantillonné tous les quatorze centimètres en moyenne (80 échantillons, soit quatre échantillons par an). Pour éliminer la contamination extérieure des carottes, nous avons utilisé la méthode de recarottage décrite au paragraphe 4.3.2., chapitre 1. La datation de ce forage a été obtenue par mesure de la radioactivité globale β de la neige (surface: janvier 1983; 9,40 m : janvier 1965; 13,80 m : janvier 1955), (Michel Pourchet, communication personnelle).

3 - SERIES SECUAIRES

3.1. LE DOME C

Les couches de névé entre deux et dix mètres de profondeur ont été étudiées à partir de deux forages distants de vingt centimètres, réalisés au Dôme C en 1979-80. L'un des deux forages a été conditionné sur le terrain en découpant les carottes tous les cinq centimètres et en éliminant la partie externe avec une scie téflonnée, les 155 échantillons ainsi obtenus sont transférés dans des "accuvettes". Le second forage a été traité en laboratoire à l'aide d'un petit carottier en téflon par la méthode décrite au paragraphe 4.3.2.; les 80 échantillons ont été conservés dans des flacons en polyéthylène.

Nous avons poursuivi notre étude entre dix et seize mètres de profondeur en découpant tous les cinq centimètres (96 échantillons) une série de carottes provenant d'un forage de 200 m; notons ici que la décontamination de ces carottes a souvent été très délicate car nous ne disposions en fait que de demi-carottes.

Au-delà de trois mètres, la datation des couches de neige en ce site devient plus imprécise (absence de signal saisonnier, absence d'horizons repères), néanmoins une accumulation moyenne de $3,6 \pm 0,5$ g d'H₂O par an a été proposée (Petit et al. 1982).

Au cours de notre travail, nous avons pu mettre en évidence trois horizons repères volcaniques (le Tambora 1815, le Krakatoa 1883, le Mont Agung 1963) qui ont permis de "caler" la datation de ces carottes jusqu'en 1815 (voir chapitre 4, paragraphe 3.2.3.1.).

3.2. LE POLE SUD

Au cours de la campagne 1983-84 au Pôle Sud, nous avons effectué plusieurs séries de prélèvements entre la surface et trente mètres de profondeur. Plusieurs manipulations ont été effectuées sur le terrain, en particulier :

- . mesure de la conductivité liquide sur un forage de 25 m (période 1800-1983) après décontamination de 470 échantillons (soit environ trois échantillons par an) à l'aide d'une scie téflonnée,

- . mesure de la conductivité "solide" sur sept forages effectués dans un rayon de dix kilomètres autour de la base.

4 - LES FORAGES PROFONDS

Des tests préliminaires ont montré (paragraphe 4.3.3.) qu'il était possible de décontaminer de manière satisfaisante des carottes de glace, même lorsqu'elles présentent de nombreuses fractures.

Pour l'étude des quatre forages, chaque section de carotte a été lavée à l'eau ultrapure jusqu'à élimination par fusion d'environ 50 à 75 % de son volume initial; la partie centrale est ensuite mise à fondre dans un flacon polyéthylène de 500 ml fermé.

Afin de minimiser les problèmes de contamination par les traces gazeuses atmosphériques (voir paragraphe 4.2.), l'eau de fusion est immédiatement transférée dans des flacons polyéthylène de 50 ml remplis à ras bord puis regelés sous double gaine jusqu'à l'analyse.

4.1. LE DOME C (905 m)

Durant la campagne d'été 1977-78, un forage profond de 905 m a été réalisé par un groupe du laboratoire au Dôme C. Cinquante deux échantillons de dix-huit centimètres (couvrant environ cinq ans), répartis tout au long de la carotte, qui couvre environ 32000 ans (Lorius et al. 1979), ont été étudiés.

4.2. VOSTOK (950 m)

Nous avons étudié dix-huit échantillons de quinze à vingt centimètres de longueur (couvrant cinq à dix ans), répartis sur les huit cents premiers mètres d'un forage de 950 m réalisé par les soviétiques à la station Vostok. La période de temps couverte par les 800 premiers mètres de notre profil a été estimée à 40-46000 ans par Shumsky et al. 1980 à partir d'un modèle d'écoulement de la calotte, puis plus récemment à 48000 ans (Catherine Ritz, communication personnelle).

4.3. BYRD (2150 m)

Dans le cadre de la coopération NSF-CNRS, nous avons pu mener une étude sur des carottes du forage de 2150 m réalisé à Byrd par les américains. Trente neuf échantillons représentant approximativement dix ans ont été sélectionnés tout le long de la carotte.

Entre 400 et 800 m, les carottes étaient en très mauvais état et nous n'avons en fait disposé que de "plaquettes verticales" de deux centimètres d'épaisseur. Si les 1800 premiers mètres de ce forage sont maintenant bien datés (Lorius et al. 1984), la datation des couches basales pose encore des problèmes actuellement mal résolus.

4.4. LA BALISE D 10 (300 m)

Nous avons étudié trente cinq échantillons de glace provenant d'un forage de 300 m effectué en Terre Adélie en 1974, à cinq kilomètres de la côte. Liée au problème d'origine de la glace, la datation des forages en zone côtière

reste très délicate. La comparaison du profil isotopique obtenu sur ce forage avec celui obtenu au Dôme C d'une part, les premiers résultats d'une récente étude de la dynamique de la calotte (Young et al. 1984) d'autre part, permettent néanmoins d'avancer que :

- . entre la surface et cent mètres de profondeur: la glace a une origine locale,

- . la brusque décroissance de la teneur en ^{18}O entre 207 et 215 m de profondeur est attribuée à un effet climatique (15000 ans),

- . à 210 m de profondeur, la glace semble provenir d'une zone située à environ 250km de la côte.

Station	Altitude (m)	Distance à la côte (km)	Température moyenne (° C)	Accumulation en surface (gH ₂ O/an)	E c h a n t i l l o n n a g e		
					Forage profond > 15000 ans	Série séculaire 200 ans	Dernières décennies 25 ans
BYRD	1524	670	- 28,6	11,0 (a)	•		
POLE SUD	2850	1274	- 50,7	8,3 (b)		•	•
DOME C	3240	1070	- 53,5	3,2 (c)	•	•	•
VOSTOK	3490	1294	- 55,6	~ (d)	•		
D 10	270	5	- 14,4	15,3 (e)	•		
D 55	2028	181	- 30,5	7,0 (f)			•
D 80	2524	432	- 41,7	23,7 (f)			•

Tableau 5 : Caractéristiques géographiques des différents sites étudiés ainsi que les échelles de temps couvertes par nos échantillonnages. Les taux d'accumulation ont été déterminés sur la période récente à l'aide de différentes méthodes par (a):Gow et al.1972, (b) Jouzel et al. 1979, (c) Petit et al. 1982, (d) Gordiyenko et al. 1980, (e) Lambert et al. 1977, (f) Michel Pourchet, communication personnelle.

CHAPITRE 3

CHIMIE DE LA PRECIPITATION

1 - INTRODUCTION

La situation géographique de l'Antarctique, continent très éloigné des autres terres de l'hémisphère Sud (Australie, Amérique du Sud, Afrique) et dont la surface est presque entièrement recouverte de glace, alliée aux caractéristiques actuelles de la circulation atmosphérique, font que les seules contributions notables à l'aérosol de ces régions proviennent des embruns marins (aérosol primaire) et de la conversion gaz-particules (aérosol secondaire). La contribution de l'aérosol émis par les continents y reste très mineure, tout au moins avec les conditions météorologiques actuelles (Shaw, 1979).

Celle de la source marine (embruns marins) est importante surtout dans les régions côtières. Son impact sur la chimie des précipitations est relativement bien connue (Briat et al., 1974; Delmas et al., 1982; Herron et Langway, 1979).

Ce n'est par contre pas le cas des impuretés dérivées de gaz, tant en ce qui concerne leur composition que leur mode d'incorporation dans la précipitation polaire.

Dans la neige antarctique, on peut donc a priori s'attendre à retrouver des composés essentiellement solubles provenant de l'aérosol marin (NaCl , Na_2SO_4 , ...), de l'aérosol formé par la conversion de certains gaz atmosphériques (NO_x , SO_2 , NH_3 ...) et éventuellement même des gaz déposés directement sur la surface (dépôt sec).

Certains composés, tels les sulfates, qui représentent une part importante des impuretés solubles contenues dans la neige peuvent avoir plusieurs origines. Pour le cas précis des sulfates, trois sources principales ont été proposées : le sel de mer, l'activité biogénique des océans et les gaz émis par les volcans (Delmas and Boutron 1978; Delmas and Boutron 1980).

La connaissance de la forme chimique sous laquelle ces composés sont présents sera un atout pour élucider leur origine.

On verra ainsi que la présence de sulfate sous forme neutre (sulfate de sodium, Na_2SO_4) sera attribuée en partie à des retombées de sel de mer alors que la forme acide (H_2SO_4) sera plutôt liée à l'aérosol secondaire d'origine biogénique ou volcanique.

L'étude structurale des impuretés (structure cristalline pure ou ions incorporés dans le réseau de la glace pour les sels; moléculaire, ionique ou même à l'état d'hydrate pour les acides), si elle est parfois praticable sur l'aérosol (Kunimoto et al., 1981; Kumai, 1976; Parungo et al., 1979) ne l'est pas dans la neige. De plus, comme nous avons affaire à des composés solubles, nous perdons la majorité de l'information concernant l'association des différents ions entre eux lors de la fusion précédant l'analyse.

Le traitement de résultats à l'aide de la méthode de l'analyse en composantes principales; méthode parfois utilisée en géochimie polaire (Boutron 1978; Herron 1980) ne paraissait pas bien adaptée à ce travail car le regroupement des éléments ne donne pas forcément d'informations précises sur la nature des composés chimiques présents.

Pour parvenir à identifier les composés chimiques, nous avons pensé qu'il était tout d'abord indispensable d'investiguer le plus largement possible la partie soluble des impuretés, en vérifiant le nécessaire équilibre entre les concentrations des cations et des anions.

La balance ionique équilibrée sur chaque échantillon doit permettre de reconstituer la forme chimique initiale des impuretés, à condition toutefois qu'il n'y ait pas de réactions chimiques (type acide-base par exemple) lors de la fusion de l'échantillon, condition qui sera vérifiée ultérieurement.

2 - RESULTATS LES PLUS RECENTS RELATIFS A LA PARTIE SOLUBLE DES IMPURETES

Au moment où nous avons entrepris cette étude, les quelques résultats disponibles concernant les éléments ou composés sodium, magnésium, potassium, calcium, ammonium, chlore, nitrate, sulfate et acidité couvraient des périodes

de temps et des zones géographiques fort disparates. De plus, les techniques analytiques utilisées étaient très variées et ne permettaient pas toujours de distinguer la forme ionique des autres formes éventuellement présentes (moléculaire ou insoluble); par exemple l'activation neutronique ne permet pas de distinguer le chlore sous forme ionique (Cl^-) du chlore moléculaire organique.

Une première étude de synthèse, concernant la partie soluble des impuretés, avait été effectuée sur la base des données disponibles, pour la neige déposée au Pôle Sud entre 1930 et 1960 (Delmas et al. 1982). Il avait été montré que la partie soluble des impuretés comprenait essentiellement les ions Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{++} , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--} que nous appellerons désormais un peu arbitrairement ions majeurs. Cependant, un excès moyen en cations de $0,8\mu\text{Eq.l}^{-1}$ (pour une charge ionique totale de $10\mu\text{Eq.l}^{-1}$) avait été mis en évidence; l'interprétation de cet excès restait délicate, car les mesures des différents ions, qui recouvraient certes la même période de temps, avaient été effectuées par différents auteurs à partir de séries d'échantillons distinctes.

C'est alors qu'une nouvelle technique analytique, la chromatographie ionique, est apparue. Nous l'avons adaptée à l'étude des traces dans la neige (voir chapitre 1). Couplée à la titration acide pour la détermination du proton, cela nous a permis d'étudier la partie soluble des impuretés d'une manière beaucoup plus systématique en déterminant tous les ions majeurs sur le même échantillon en seulement quatre analyses.

3 - TERMINOLOGIE ET UNITES UTILISEES

Tous nos résultats de mesure seront donnés en général à la fois en nanogramme par gramme (ng.g^{-1} , encore appelé ppb suivant la terminologie anglaise) comme cela est souvent le cas dans la littérature et en microéquivalents par litre ($\mu\text{Eq.l}^{-1}$), cette dernière unité étant mieux adaptée aux calculs de balance ionique et d'identification de composés.

Dans les calculs qui vont suivre, nous écrirons de manière conventionnelle les concentrations des composés avec des crochets lorsque celles-ci seront exprimées en $\mu\text{Eq.l}^{-1}$ et sans crochets lorsqu'elles seront exprimées en ng.g^{-1} .

Une table de conversion des $\mu\text{Eq.l}^{-1}$ en ng.g^{-1} est présentée (tableau 6) pour les principaux ions dont il sera question dans cette étude.

ion	1 $\mu\text{Eq.l}^{-1}$ équivaut à (ng.g^{-1})	10 ng.g^{-1} équivalent à ($\mu\text{Eq.l}^{-1}$)
Na^+	23,0	0,43
NH_4^+	18,0	0,56
K^+	39,0	0,26
Mg^{++}	12,0	0,83
Ca^{++}	20,0	0,50
H^+	1,0	10,00
Cl^-	35,5	0,28
NO_3^-	62,0	0,16
SO_4^{--}	48,0	0,21
F^-	19,0	0,53
HCOO^-	45,0	0,22
CH_3COO^-	59,0	0,17

Tableau 6 : Conversion des $\mu\text{Eq.l}^{-1}$ en ng.g^{-1}

La terminologie en "excès" que nous allons utiliser est celle couramment employée dans la littérature pour qualifier la part d'un élément ne provenant pas du sel de mer.

Ainsi, l'excès d'un composé X par rapport à la source marine s'écrit :

$$[X]_{\text{ex.}} = [X] - R_X [Na^+] \quad (1)$$

où R_X est le rapport $\frac{X}{Na^+}$ dans l'eau de mer.

Cependant, on peut rencontrer des cas où il y a un déficit de X, c'est-à-dire un excès de sodium par rapport à la composition du sel de mer. On écrit alors :

$$[Na^+]_{\text{ex.}} = [Na^+] - 0,85 [Cl^-] \quad (2)$$

Composé ou élément	Cl^-	Na^+	SO_4^{--}	Mg^{++}	Ca^{++}	K^+
R (ng.g ⁻¹)	1,80	0,56	0,25	0,12	0,038	0,037
R (μEq.l ⁻¹)	1,166	0,8576	0,121	0,23	0,044	0,022

Tableau 7 : Rapport entre éléments (ou composés) dans l'eau de mer, (d'après Holland, 1978).

4 - BILAN IONIQUE ET IDENTIFICATION DES COMPOSES DANS LA NEIGE DE SURFACE

Sur plusieurs centaines d'échantillons de neige récente (c'est-à-dire en général jusqu'à quelques dizaines de mètres de profondeur) provenant de plusieurs stations de l'Antarctique (D 55, D 80, Dôme C et Pôle Sud), l'analyse des ions Na^+ , NH_4^+ , K^+ , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--} a été effectuée et cela de manière systématique sur chaque échantillon.

4.1. BALANCE IONIQUE DE LA NEIGE DE SURFACE

Pour chaque échantillon, nous avons calculé la charge ionique (Σ), définie par la somme des concentrations de tous les cations et anions (exprimés en micro-équivalents par litre) :

$$\Sigma = [\text{Na}^+] + [\text{Mg}^{++}] + [\text{NH}_4^+] + [\text{K}^+] + [\text{H}^+] + [\text{Cl}^-] + [\text{NO}_3^-] + [\text{SO}_4^{--}] \quad (3)$$

La méthode analytique employée (voir paragraphe 3.4., chapitre 1) permet de mesurer aisément les alcalins; les alcalino-terreux (Ca^{++} et Mg^{++}) nécessitent une manipulation spéciale et plus difficile. C'est pourquoi, nous avons convenu de prendre une valeur calculée et non mesurée pour le magnésium qui, généralement, dans la neige actuelle, provient essentiellement du sel de mer et cela sans fractionnement (Boutron, 1978). Dans l'équation précédente (3), le magnésium sera donc estimé (voir tableau 7) par :

$$[\text{Mg}^{++}] = 0,23 [\text{Na}^+] \quad (4)$$

Le calcium, a, quant à lui, été carrément négligé car sa contribution ionique n'est que le 1/25ème de celle du sodium (voir tableau 7).

Par contre, nous avons pris en compte la valeur expérimentale du potassium qui, de toute façon, était déterminé en même temps que le sodium et l'ammonium.

Nous appellerons ΔC le déséquilibre éventuel entre les cations et les anions :

$$\Delta C = [\text{Na}^+] + [\text{Mg}^{++}] + [\text{NH}_4^+] + [\text{K}^+] + [\text{H}^+] - [\text{Cl}^-] - [\text{NO}_3^-] - [\text{SO}_4^{--}] \quad (5)$$

Les résultats concernant la charge ionique (Σ) et la balance ionique (ΔC) sont présentés sur les figures 18 (Pôle Sud), 19 - 22 (Dôme C), 20 (D 80), 21 (axe Dumont d'Urville - Dôme C). Les résultats particuliers de D 55 seront traités plus loin.

Le déséquilibre ionique obtenu est généralement voisin de zéro; en effet, sur cinq cents échantillons, cinquante huit d'entre eux présentent un déséquilibre de plus de 10% de leur charge ionique Σ . Parmi eux, neuf seulement dépassent la barre des 15%, avec une valeur maximum à 22%.

Aux erreurs expérimentales près (voisines de 10%, voir chapitre 1), nous pouvons donc considérer en première approximation avoir équilibré la balance ionique de la précipitation antarctique avec les seuls ions Na^+ , Mg^{++} , NH_4^+ , K^+ , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--} . Cependant une observation plus approfondie de nos résultats montre que le petit déséquilibre entre cations et anions est systématiquement positif. Ceci peut s'interpréter de deux manières :

- . ou bien une erreur systématique au niveau de la mesure a pu entraîner une surestimation de la concentration d'un ou de plusieurs cations (ou inversement une sous-estimation d'un ou plusieurs anions),
- . ou bien il existe un anion supplémentaire dans la neige.

Nous excluons le premier cas de figure car au cours des longues séries d'analyses effectuées, nous avons pris la précaution de refaire périodiquement des solutions mères à partir de produits différents (voir paragraphe 3.4., chapitre 1), de vérifier ou de changer les pipettes utilisées pour la fabrication des solutions étalons par dilution de ces mêmes solutions mères. Par contre, la présence d'un anion non identifié peut être envisagée. Signalons à ce propos que la chromatographie ionique est une méthode d'analyse quantitative pour les ions étudiés, mais aussi qualitative car, sur les chromatogrammes nous pouvions éventuellement déceler le nitrite (NO_2^-), le phosphate (PO_4^{--}), le brome (Br^-) et l'oxalate ($\text{C}_2\text{H}_5\text{CO}_2\text{COO}^-$) s'ils avaient été présents à des teneurs supérieures à 1 ng.g^{-1} (soit $0,01 \mu\text{Eq.l}^{-1}$ dans le meilleur des cas).

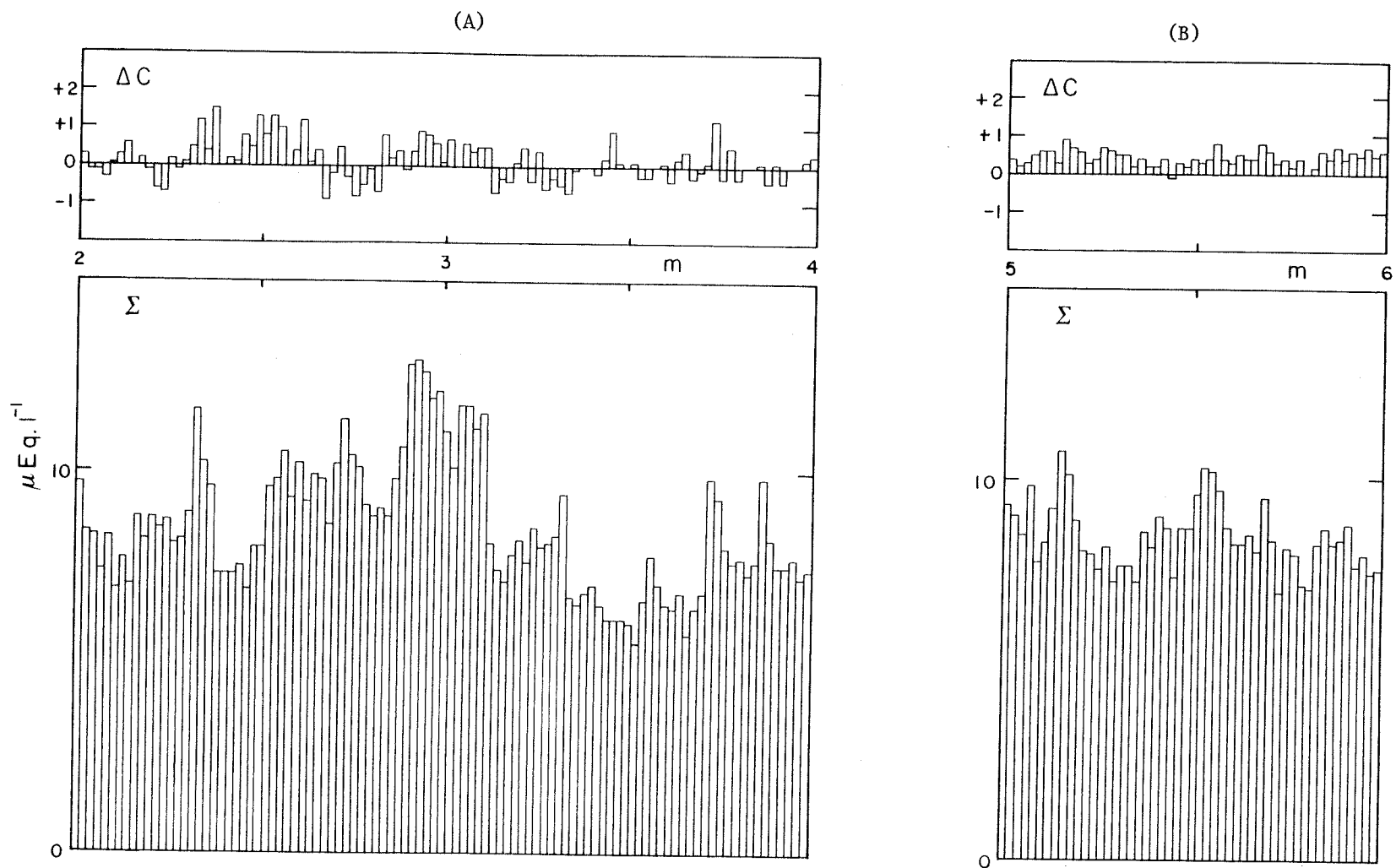


Figure 18 : Charge ionique Σ (somme des anions et cations), déséquilibre ΔC observé entre cations et anions dans le neige déposée au Pôle Sud entre 1959 et 1969 (A), entre 1949 et 1954 (B).

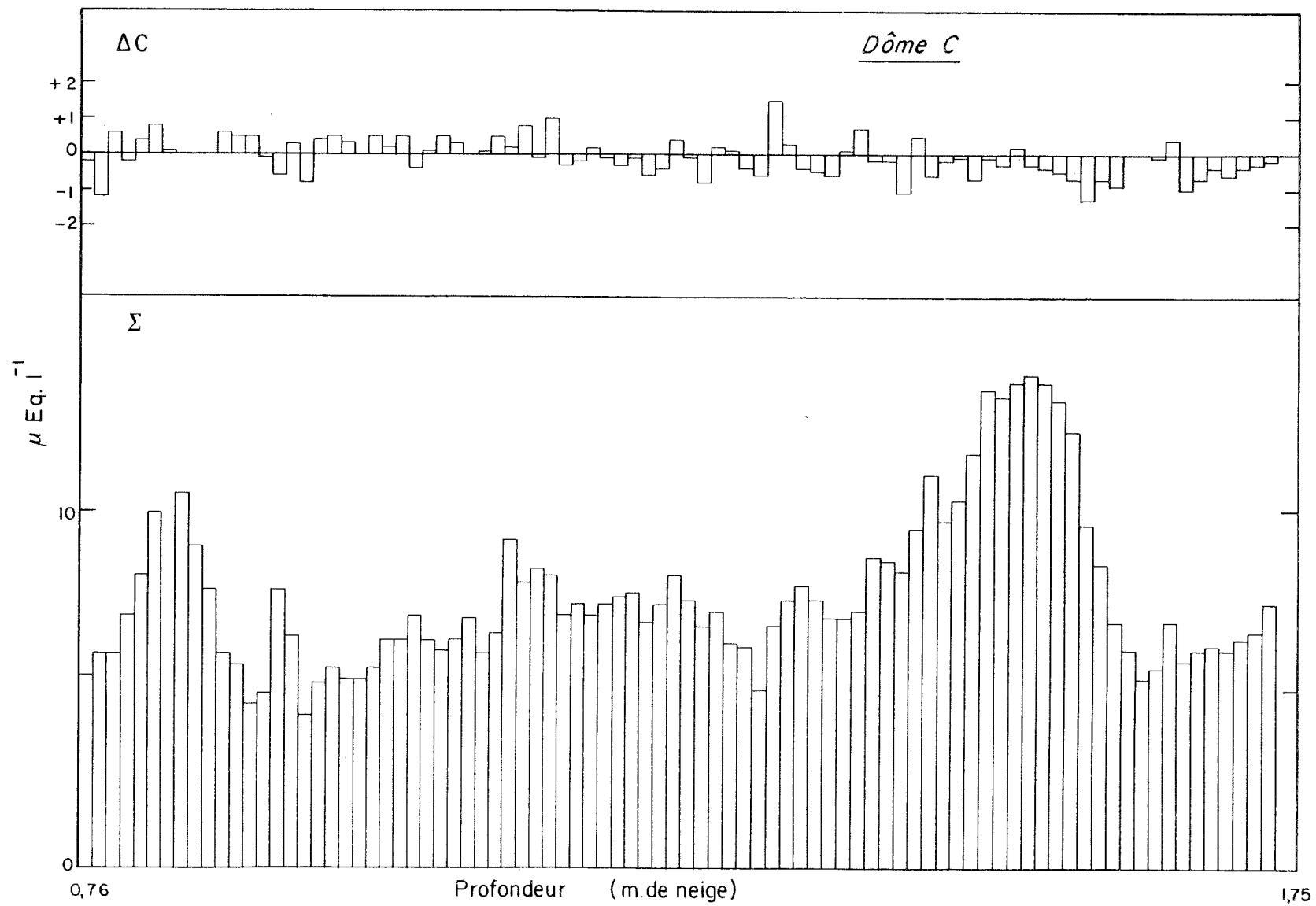


Figure 19 : Σ et ΔC pour la neige du Dôme C entre 0,76 et 1,75 m (période 1962-1973).

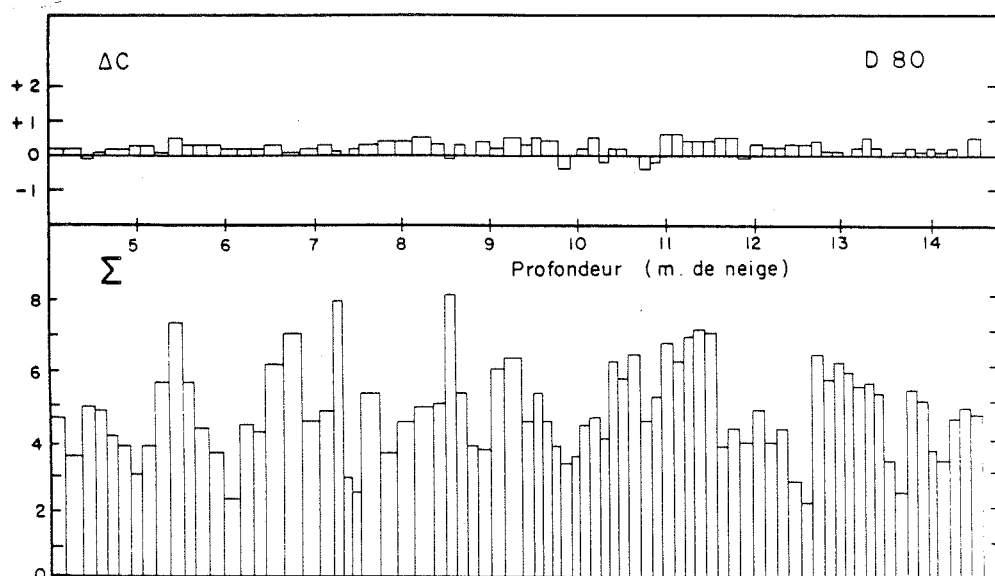


Figure 20 : Σ et ΔC pour la neige de D 80 entre 4 et 15 m de profondeur
Période (1953-1975)

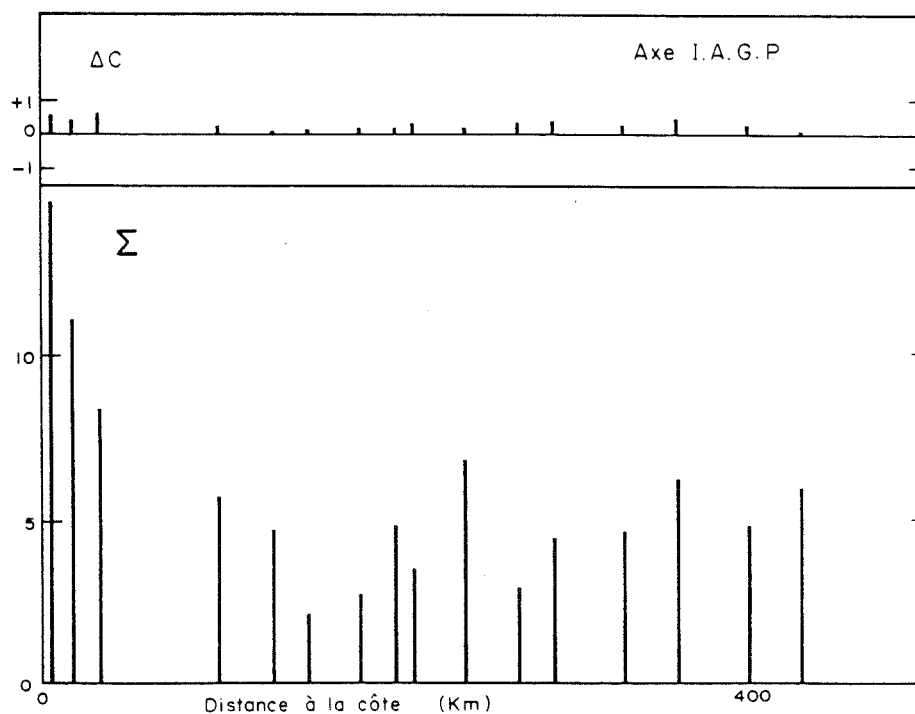


Figure 21 : Σ et ΔC pour les échantillons de neige de surface prélevés
sur les 400 premiers kilomètres de l'axe Dumont d'Urville
Dôme C.

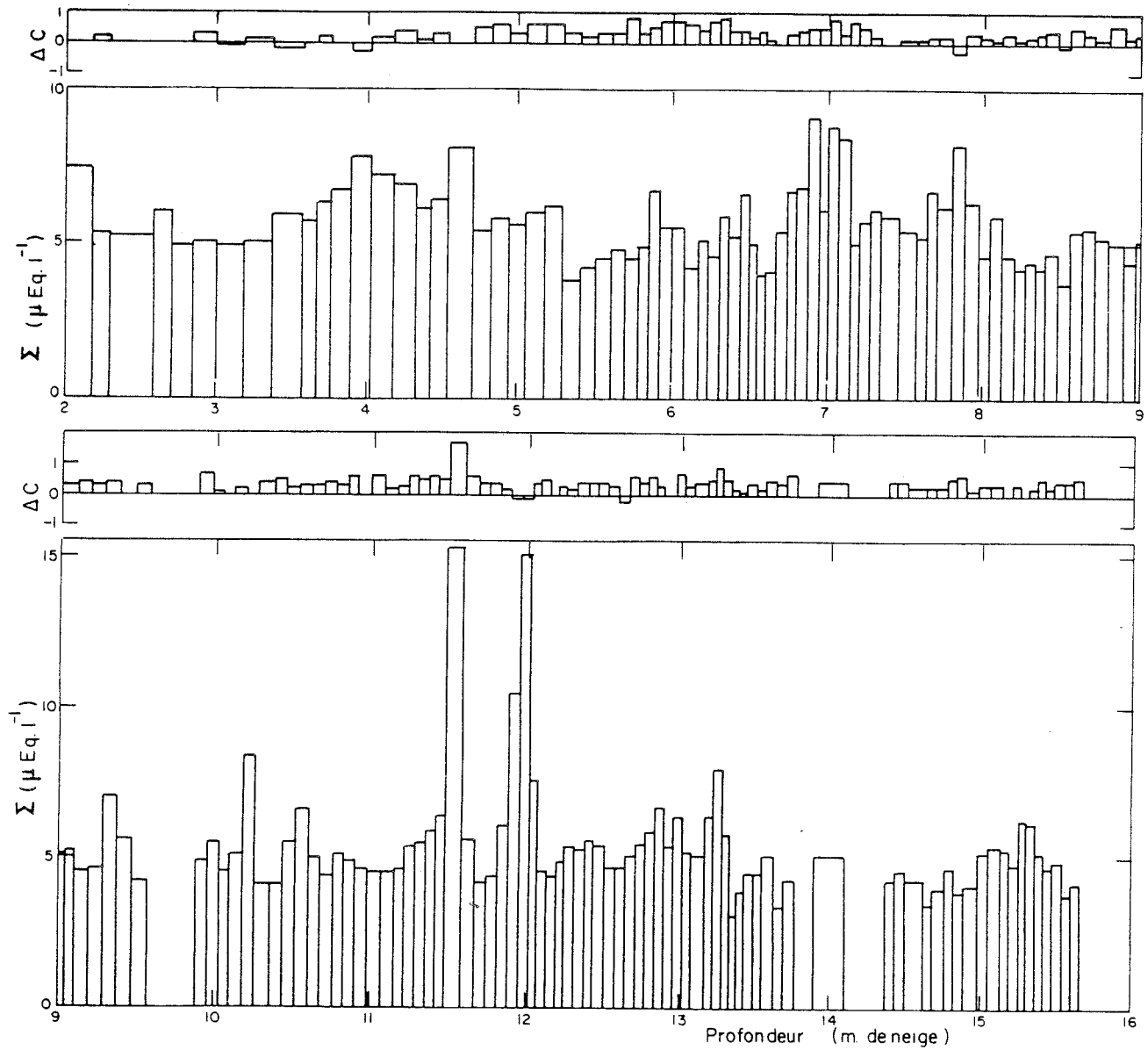


Figure 22 : Σ et ΔC pour la neige de Dôme C entre 2 et 16 m de profondeur (période 1780-1959).

Sur le spectre des anions nous avons parfois décelé deux petits pics (voir figure 4c.A, chapitre 1) précédant celui du chlore. Nous avons identifié ces deux pics comme étant dûs à la présence de fluor (F^-) et de formiate ($HCOO^-$) (voir paragraphe 3.4., chapitre 1). La détermination quantitative de ces deux ions (F^- et $HCOO^-$) n'était pas possible dans les conditions opératoires utilisées pour les anions majeurs (Cl^- , NO_3^- , et SO_4^{--}) car, en raison de leur temps de rétention très réduit, ils apparaissent dans la remontée du pic négatif de l'eau (figure 4c.A). Nous pouvons cependant donner une limite supérieure de 3 ng.g^{-1} pour le fluor (F^-) et de 7 ng.g^{-1} pour le formiate ($HCOO^-$) (ce qui correspond à $0,16 \mu\text{Eq.l}^{-1}$ pour chacun d'eux) dans nos échantillons. Actuellement, aucune donnée n'existe concernant ces deux ions dans la précipitation antarctique.

Le fluor a été mesuré dans la précipitation arctique, à des teneurs non négligeables par rapport à la charge ionique que nous avons observée dans la neige antarctique (Herron 1982). Par ailleurs, l'importance de l'acide formique a récemment été suggéré dans la précipitation des régions tempérées de l'hémisphère Sud (Keene et al. 1983).

Ces considérations, ainsi que l'ensemble de nos observations suggèrent que ces deux composés (probablement présents sous forme d'acides : HF et HCOOH) peuvent expliquer l'excès systématique de cations de notre budget ionique mais toutefois à des concentrations limitées ($0,1 \mu\text{Eq.l}^{-1}$ en moyenne).

Par contre, pour les soixante dix échantillons collectés dans un puits à D 55, nous n'avons pas pu équilibrer la balance ionique. En effet, sur ces échantillons nous avons observé des valeurs de l'acidité anormalement élevées ($5 \text{ à } 8 \mu\text{Eq.l}^{-1}$) pour toutes les mesures. Qui plus est, sur le chromatogramme des anions, nous avons observé deux pics importants mais très mal séparés (correspondant à des acides organiques, voir figure 4c.A, paragraphe 3.3., chapitre 1). Les teneurs en Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--} étaient tout à fait normales, les teneurs en ammonium semblant quant à elles un peu plus élevées que d'habitude (par comparaison avec les résultats obtenus sur les échantillons de surface prélevés le long de l'axe Dumont d'Urville - Dôme C). Nous avons donc conclu que ces échantillons dont il faut rappeler qu'ils avaient été mal isolés de l'atmosphère après leur collecte (voir paragraphe 2.3., chapitre 2), ont été contaminés par des composés organiques vraisemblablement volatils dont l'origine n'est pas encore clairement élucidée (peut-être le marquage des gaines plastiques au stylo feutre dont le séchage est particulièrement lent à basse température ou encore le dégazage du P.V.C.

des cantines nettoyées avec des solvants divers (éther, chloroforme, acétone, alcool) ou encore oxydation lente du formaldéhyde utilisé par d'autres opérateurs dans les salles blanches).

Mis à part ce cas particulier, nous avons donc pour la première fois réalisé la balance ionique de la précipitation antarctique récente et cela en considérant uniquement les ions Na^+ , Mg^{++} , K^+ , NH_4^+ , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--} .

4.2. CONSTITUTION DE LA PARTIE SOLUBLE DES IMPURETES ET COMPARAISON AVEC LES RESULTATS ANTERIEURS

Les échantillons provenant des quatre sites (D 55, D 80, Dôme C et Pôle Sud) couvrent une période de temps commune (1959-1969), le choix de cette période a été guidé par des considérations géochimiques (en particulier l'impact de l'éruption du volcan Agung en 1963 sur la chimie atmosphérique).

La composition ionique moyenne de la neige de chaque site est présentée dans le tableau 8; dans le cas particulier de D 55, la teneur moyenne en proton a été estimée en supposant la balance ionique équilibrée. Les importantes variations géographiques que mettent en évidence ces résultats seront discutées ultérieurement.

Pour tous les sites, sur une charge ionique voisine de $5 \text{ à } 10 \mu\text{Eq.l}^{-1}$, le proton apparaît toujours comme le constituant majeur de la partie soluble, tandis que le potassium et l'ammonium restent des constituants mineurs (voir figure 23).

L'ammonium

Les teneurs en ammonium que nous avons obtenues sont très faibles et en total désaccord avec les résultats d'études antérieures portant sur la neige antarctique (voir tableau 9).

Les difficultés rencontrées lors de la détermination de l'ammonium ont été exposées au chapitre 1 (contamination très importante et rapide par les gaz traces atmosphériques, paragraphe 4.2.). Elles peuvent expliquer que les résultats publiés antérieurement pour la précipitation antarctique soient erronés (par excès).

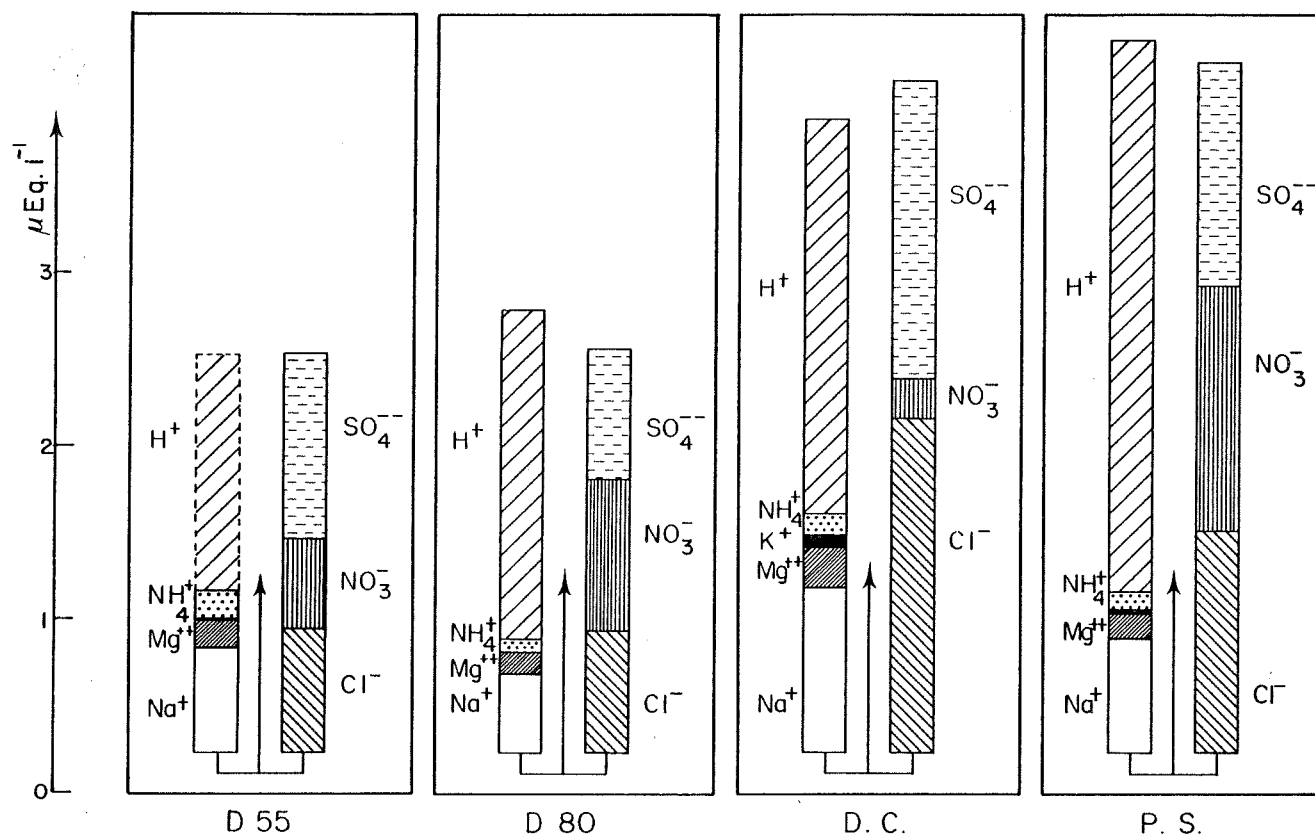


Figure 23 : Constitution moyenne de la partie soluble des impuretés en quatre sites différents de l'Antarctique pour la période 1959-1969 : D 55 et D 80 en Terre Adélie, le Dôme C (D.C.) et le Pôle Sud (P.S.) sur le plateau central.

Sites de prélèvement	Na ⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δ C	Σ
D 55 (68 échantillons)	0,60 (± 0,53)	0,14 (± 0,12)	0,02 (± 0,01)	0,17 (± 0,06)	(1,36)	0,70 (± 0,56)	0,53 (± 0,21)	1,06 (± 0,47)	(0)	(4,58)
D 80 (37 échantillons)	0,46 (± 0,39)	0,11 (± 0,09)	0,01 (± 0,01)	0,06 (± 0,04)	1,92 (± 0,57)	0,70 (± 0,44)	0,87 (± 0,27)	0,75 (± 0,34)	+ 0,24 (± 0,27)	4,9 (± 1,3)
Dôme C (80 échantillons)	0,96 (± 0,39)	0,22 (± 0,09)	0,06 (± 0,03)	0,13 (± 0,04)	2,54 (± 1,18)	1,93 (± 0,32)	0,17 (± 0,03)	1,98 (± 1,13)	- 0,20 (± 0,50)	8,0 (± 2,1)
Pôle Sud (90 échantillons)	0,64 (± 0,25)	0,15 (± 0,06)	0,03 (± 0,01)	0,15 (± 0,09)	3,39 (± 0,98)	1,27 (± 0,37)	1,42 (± 0,20)	1,54 (± 0,79)	+ 0,14 (± 0,52)	8,6 (± 1,8)

Tableau 8 : Bilan ionique moyen de la neige déposée à D 55, D 80, Dôme C et Pôle Sud durant la période 1959-1969 (l'ensemble des valeurs est donnée en $\mu\text{Eq.l}^{-1}$).

Par ailleurs, nos résultats permettent d'expliquer a posteriori l'excès de cations de $0,9\mu\text{Eq.l}^{-1}$ obtenu lors de la première étude globale de la partie soluble des impuretés contenue dans la neige du Pôle Sud (Delmas et al., 1982). La valeur moyenne de $1\mu\text{Eq.l}^{-1}$ de NH_4^+ utilisée dans les calculs était celle publiée par Parker et al. (1977), valeur trop élevée au vu de nos propres résultats (valeur moyenne : $0,15\mu\text{Eq.l}^{-1}$, voir tableau 8).

Comme nous le verrons ultérieurement, les teneurs en ammonium que nous observons dans le névé sont systématiquement plus élevées que celles obtenues dans la glace. Cette observation nous amène à considérer nos valeurs d'ammonium dans le névé, non comme des valeurs absolues, mais plutôt une limite supérieure (la glace étant un matériau bien moins susceptible que le névé d'être contaminé par les gaz traces).

Nous avons néanmoins poursuivi nos déterminations systématiques de la teneur en ammonium car même si ce composé intervient peu dans le budget ionique (4% au mieux), il s'est révélé être un traceur très sensible de la contamination par exposition accidentelle des échantillons à une atmosphère polluée.

Le potassium

Nos valeurs de potassium obtenues sur les échantillons de neige du Dôme C et du Pôle Sud semblent nettement supérieures à celles obtenues par d'autres auteurs sur les mêmes couches de neige (tableau 9). De fait, pour ces deux sites, nos échantillons ont été collectés dans des puits à l'aide d'accuvettes. La mesure ultérieure des blancs de ces récipients ($0,5$ à $1,0\text{ ng.g}^{-1}$) a démontré que ce type de conditionnement n'était pas approprié à la mesure du potassium.

Par contre, les échantillons prélevés à D 55 et à D 80 qui eux ont été conservés dans de la gaine "S.N.D.I." ou en flacons polyéthylène, présentent des teneurs en accord avec les valeurs publiées dans la littérature (tableau 9).

Comme pour l'ammonium, la détermination du potassium n'est pas très importante pour l'établissement de la balance ionique (il représente au mieux 1% du budget ionique), mais le potassium s'est révélé être aussi particulièrement utile pour juger de la qualité d'un échantillonnage. En effet, au cours des tests de décontamination d'échantillons, nous avons souvent observé une contamination de l'ordre de quelques ng.g^{-1} de potassium, tandis que tous les autres composés étaient corrects (figure 14, paragraphe 4.3.2., chapitre 1); une telle contamination est aisément décelable car le rapport K/Na obtenu devient très supérieur au rapport attendu dans la neige de surface (voisin de celui dans l'eau de mer, Boutron, 1978).

Le sodium

D'une façon générale, les valeurs de sodium obtenues sont en bon accord avec les nombreuses études antérieures (tableau 9).

Le sulfate

Les teneurs en sulfate obtenues dans ce travail pour la neige du Dôme C et du Pôle Sud se comparent bien à celles présentées par Delmas et Boutron (1978); les valeurs un peu plus élevées obtenues par ces auteurs en Terre Adélie pour la période 1971-73 s'expliquent vraisemblablement par la variabilité naturelle des concentrations d'une année sur l'autre (voir tableau 9).

Le chlore

La comparaison directe de nos résultats de chlore avec d'autres études n'est pas très facile car les mesures ne couvrent généralement pas la même période de temps. Notons cependant qu'au Pôle Sud les ordres de grandeur sont comparables tandis que sur l'axe Dumont d'Urville-Dôme C, un écart important apparaît entre nos valeurs et celles publiées par Briat et al. 1974, pour la région de Terre Adélie située entre deux cents et quatre cents kilomètres de la côte (voir tableau 9). Ces résultats antérieurs ont été obtenus par activation neutronique et les échantillons peuvent donc avoir été contaminés accidentellement par suite d'une fuite de chlorure de méthyle (fluide utilisé au laboratoire, voir paragraphe 4.2., chapitre 1).

Elément (ou composé)	NH ₄ ⁺			NO ₃ ⁻		
Nos mesures	Dôme C (1959 - 1969) 2,2 ± 0,7	Pôle Sud (1959 - 1969) 2,7 ± 1,6		Dôme C (1959 - 1969) 10,5 ± 2,0	Pôle Sud (1959 - 1969) 88 ± 12	
Mesures antérieures	Dôme C (1965 - 1978) 12 < 18 < 40	Pôle Sud (1965 - 1978) 4 < 7 < 27		Dôme C (1965 - 1978) 11 < 27 < 102	Pôle Sud (1965 - 1978) 40 < 106 < 275	
Références	Parker et Zeller(1980)	Parker et Zeller (1980)		Parker et Zeller (1980)	Parker et Zeller (1980)	
Elément (ou composé)	K ⁺			Cl ⁻		
Nos mesures	Dôme C (1959-1969) 2,3 ± 1,2	Pôle Sud (1959-1969) 1,2 ± 0,4	D 80 (1959-1969) 0,40 ± 0,04	Pôle Sud (1959-1969) 45 ± 13	Terre Adélie (1981-83) 14 < < 40	
Mesures antérieures	0,8 + 0,2	1,0 + 0,3	D 80 (1962-1969) 0,59 + 0,35	Pôle Sud (1930-1960) 28 < 43 < 76	Terre Adélie (1971-73) 68 < < 191	
Références	Boutron et Lorius(1979)	Boutron (1982)	Boutron (1981)	Delmas et al. (1982)	Briat et al. (1974)	
Elément (ou composé)	SO ₄ ⁻			Na ⁺		
Nos mesures	Dôme C (1959-1969) 95 ± 54	Pôle Sud (1959-1969) 75 ± 38	Terre Adélie(1981-83) 17 < < 44	Dôme C(1959-1969) 22 ± 9	Pôle Sud(1959-1969) 15 ± 6	D 80 (1959-69) 11 ± 9,0
Mesures anrérieures	95 ± 25	75 ± 25	Terre Adélie(1971-72) 55 < < 70	Dôme C(1959-1969) 21,6 ± 4,5	Pôle Sud(1959-1969) 10,2 ± 2,5	D 80 (1962-69) 5,3 ± 2,3
Références	Delmas et Boutron (1978)	Delmas et Boutron (1978)	Delmas et Boutron (1978)	Boutron et Lorius (1979)	Boutron (1982)	Boutron (1981)

Tableau 9 : Comparaison des teneurs (en ng.g^{-1}) en ions majeurs obtenues dans notre travail avec celles des études antérieures les plus récentes.

Le nitrate

Les seules valeurs de nitrate publiées pour la neige récente concernaient le Pôles Sud et le Dôme C. Par comparaison avec nos résultats (voir tableau 9), les valeurs obtenues par ces auteurs sont plus élevées tout comme pour l'ammonium qui a d'ailleurs été mesuré à partir des mêmes échantillons. Par contre, Herron a obtenu sur des échantillons du Pôles Sud des valeurs très comparables à nos valeurs, cela suggère que les valeurs publiées par Parker et Zeller (1980) sont surestimées, comme le signaleront d'ailleurs ultérieurement ces mêmes auteurs.

4.3. RECONSTITUTION DE L'ACIDITE DE LA NEIGE DE SURFACE

L'obtention d'une balance ionique bien équilibrée entre les cations et les anions est l'étape nécessaire pour avoir des chances de retrouver les associations initiales des différents ions entre eux. Nous traitons tout d'abord le cas du proton (H^+), qui comme nous venons de le voir, représente l'impureté soluble majeure de la précipitation antarctique.

Pour réaliser les calculs qui vont suivre, on fait l'hypothèse logique sur la base des résultats antérieurs (Boutron 1978, Briat et al. 1974) que le sodium dans la précipitation est lié à la présence de sel de mer.

Le sodium se trouve associé à du chlore, du magnésium, du potassium et du sulfate dans les proportions déjà rapportées au tableau 7 :

$$[Mg^{++}] = 0,23 [Na^+] \quad (4)$$

$$[K^+] = 0,022 [Na^+] \quad (6)$$

$$[Cl^-] = 1,166 [Na^+] \quad (7)$$

$$[SO_4^{--}] = 0,121 [Na^+] \quad (8)$$

La balance ionique équilibrée ($\Delta C = 0$) se traduit par l'équation :

$$[Na^+] + [NH_4^+] + [K^+] + [Mg^{++}] + [H^+] = [Cl^-] + [NO_3^-] + [SO_4^{--}] \quad (9)$$

Les corrélations entre le potassium et le sodium

(à D 55 : $[K^+] = 0,002 + 0,0218 [Na^+]$ avec un coefficient de corrélation $r=0,85$;

à D 80 : $[K^+] = 0,0002 + 0,0254 [Na^+]$ avec un coefficient de corrélation $r=0,95$;

sur l'axe Dumont d'Urville-Dôme C : $[K^+] = 0,002 + 0,0183 [Na^+]$ avec $r=0,99$)

suggèrent que la majeure partie du potassium est d'origine marine.

En retranchant toute la contribution du sel de mer dans l'équation (9)

($[Na^+] + [Mg^{++}] + [K^+]$ à gauche, $[Cl^-] + [SO_4^{--}]$ à droite)

nous obtenons :

$$[NH_4^+] + [H^+] = ([Cl^-] - 1,166 [Na^+]) + [NO_3^-] + ([SO_4^{--}] - 0,121 [Na^+]) \quad (10)$$

Par définition des quantités en excès (équation (1)), il vient :

$$[NH_4^+] + [H^+] = [Cl^-]_{ex.} + [NO_3^-] + [SO_4^{--}]_{ex.} \quad (11)$$

En négligeant l'ammonium qui est une quantité mineure devant les autres, (voir paragraphe précédent) :

$$[H^+] = [Cl^-]_{ex.} + [NO_3^-] + [SO_4^{--}]_{ex.} \quad (12)$$

Pour les trois sites (D 80, Dôme C et Pôle Sud) où nous avons pu équilibrer la balance ionique, l'équation (12) qui est visualisée par les diagrammes présentés sur la figure 24 indique que, tout au moins de manière globale, le proton est directement lié à la présence de nitrate (NO_3^-) et aux parties de chlore et de sulfate présentes en excès par rapport au sel de mer.

Pour D 80, le diagramme A (figure 24) montre clairement que tout le nitrate est présent à l'état d'acide nitrique (HNO_3) et que le sulfate en excès est en fait de l'acide sulfurique (H_2SO_4).

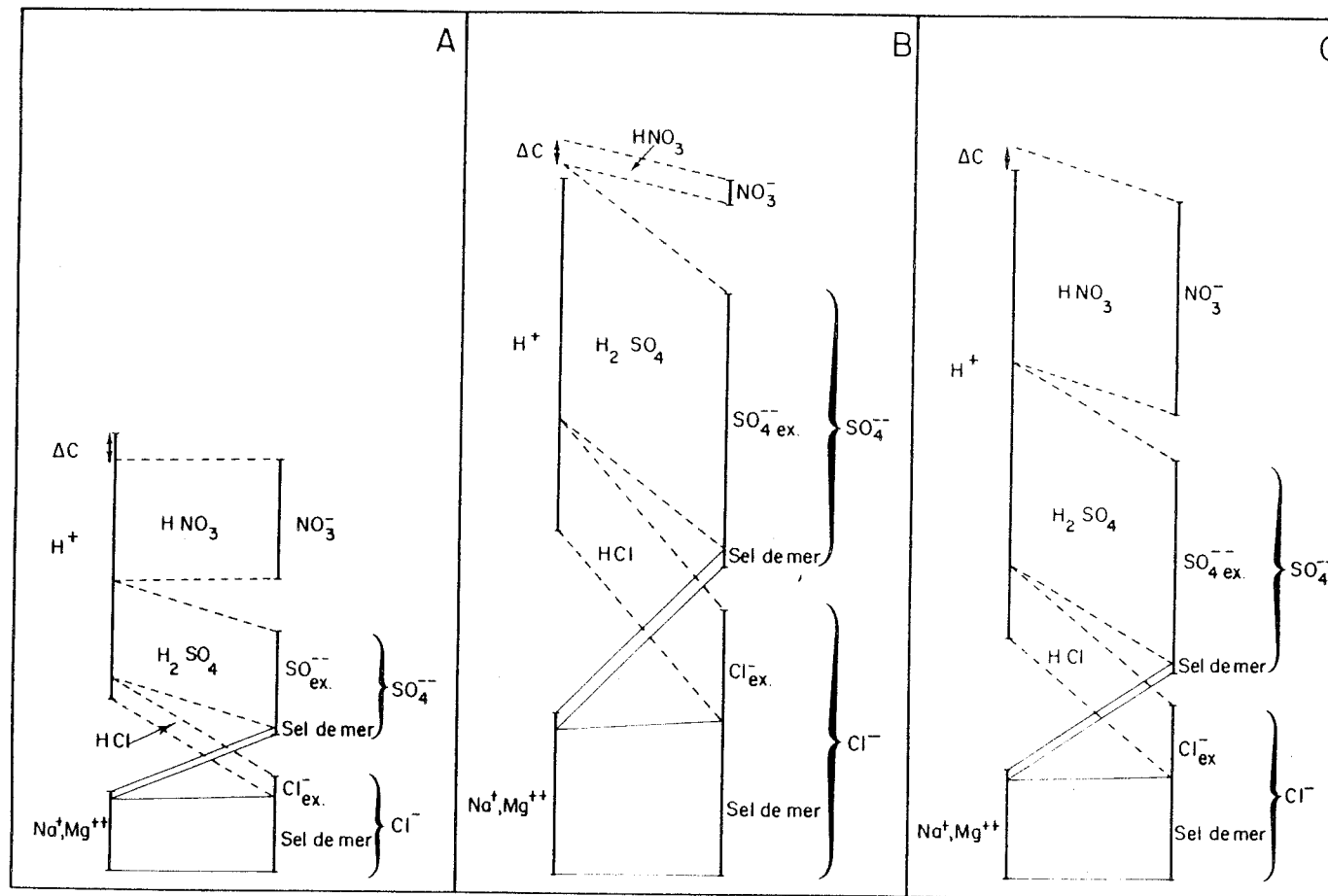


Figure 24 : Diagramme de reconstitution de l'acidité : (A) à D 80, (B) à Dôme C, (C) à Pôle Sud

Site	% HCl	% HNO ₃	% H ₂ SO ₄
D 55	3,0 ± 3,6	36,0 ± 9,0	61,0 ± 10,0
D 80	10,5 ± 3,7	52,0 ± 12,0	38,0 ± 11,0
Pôle Sud	15,4 ± 6,0	44,5 ± 9,6	40,0 ± 12,0
Dôme C	30,5 ± 17,5	6,5 ± 2,3	62,7 ± 17,0

Tableau 10 : Contribution (en %) des trois acides minéraux à l'acidité totale, pour la neige déposée entre 1959 et 1969, en quatre sites de l'Antarctique.

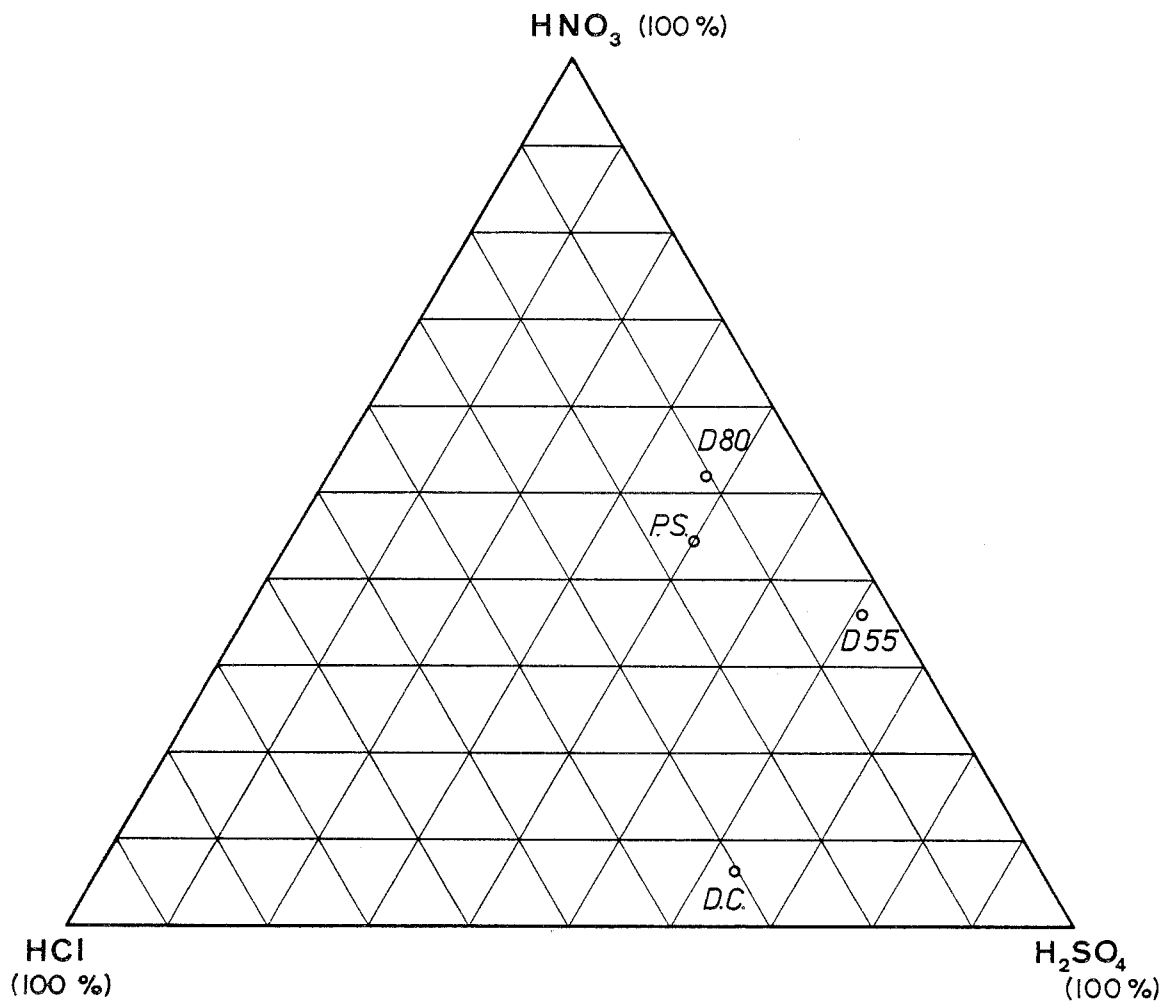


Figure 25 : Contribution relative des trois acides minéraux HCl, HNO₃ et H₂SO₄ à l'acidité totale (diagramme triangulaire) pour différentes stations.

L'identification du chlore en excès comme étant de l'acide chlorhydrique (HCl) n'est pas facile pour ce site (la quantité de chlore en excès voisine de $0,2 \mu\text{Eq.l}^{-1}$ étant du même ordre de grandeur que les erreurs expérimentales sur la balance ionique). Par contre, cette identification est aisée au Dôme C (diagramme B, figure 24). Au Pôle Sud, le diagramme C (figure 24) permet d'identifier simultanément les trois acides HCl, HNO_3 et H_2SO_4 .

La contribution relative des trois acides à l'acidité totale a été calculée sur chaque échantillon (tableau 10), le point moyen obtenu en chaque site est reporté sur un diagramme triangulaire (HCl, HNO_3 et H_2SO_4) (figure 25). Les importantes différences que ce diagramme fait apparaître concernant la composition de l'acidité, seront discutées ultérieurement.

4.4. IDENTIFICATION DES COMPOSES CHIMIQUES RESPONSABLES DES ECARTS OBSERVES ENTRE LE RAPPORT Cl/Na DANS LA NEIGE ET DANS L'EAU DE MER

Pour tous les échantillons couvrant la période 1959-1969, nous avons pu observer des rapports Cl/Na supérieurs ou égaux à la valeur dans l'eau de mer ($> 1,8$ voir tableau 7); l'excès de chlore correspondant étant de l'acide chlorhydrique.

Lors d'une étude portant sur une échelle de temps plus grande au Dôme C, nous avons constaté que les rapports Cl/Na supérieurs à 1,8 n'étaient pas une constante en ce site et pouvaient devenir au contraire largement inférieurs à cette valeur (atteignant parfois 0,4, voir tableau A.2.20). Nous avons reconstitué le budget ionique moyen de la neige déposée entre 1860 et 1880, période durant laquelle le rapport Cl/Na est particulièrement faible ($\text{Cl/Na} = 0,9 \pm 0,3$) (figure 26).

Sur une autre période de temps où l'on observe des rapports Cl/Na faibles (1907-1916, $\text{Cl/Na} = 0,84 \pm 0,35$), Boutron (1979) observe un rapport

$\frac{\text{Mg}}{\text{Na}}$ très voisin du rapport de l'eau de mer (0,15 au lieu de 0,12).

Cette observation permet d'éliminer l'hypothèse d'un excès de sodium provenant d'une source autre que la source océanique.

Pour expliquer le faible rapport Cl/Na parfois observé dans la neige, nous ne pouvons donc qu'avancer l'hypothèse d'une perte de chlore, le problème posé étant alors d'identifier l'anion qui s'est substitué au chlore. La figure 26 suggère que la perte de chlore a pu se faire soit aux dépens du nitrate et du sulfate, soit aux dépens du seul sulfate; le nitrate étant présent à des concentrations trop faibles pour "compenser" à lui seul toute la perte de chlore. Par ailleurs, les teneurs en nitrate n'évoluent pas de manière significative lorsque l'on passe du cas où le rapport Cl/Na est supérieur à 1,8 (1959-1969, $Cl/Na = 4,1$; $[NO_3^-] = 0,17 \pm 0,03$) au cas où le rapport Cl/Na est inférieur à 1,8 (1860-1880, $Cl/Na = 0,9$; $[NO_3^-] = 0,26 \pm 0,06$). Nous considérons que la perte de chlore s'est faite entièrement aux dépens du sulfate.

Dans ce cas, l'excès de sulfate possède deux composantes, l'une neutre associée à la perte de chlore, l'autre acide (notée $SO_4^{-- \star}$ ex.) sous forme d'acide sulfurique. Ceci nous amène à reconsidérer les calculs du paragraphe précédent en posant :

$$[Cl^- \text{ perdu}] = [Cl^-] - 1,166 [Na^+] \quad (\text{quantité} < 0) \quad (13)$$

$$[SO_4^{-- \star} \text{ ex.}] = [SO_4^{--} \text{ ex.}] - [Cl^- \text{ perdu}] \quad (14)$$

$$\text{d'où} \quad [SO_4^{-- \star} \text{ ex.}] = [SO_4^{--}] - 0,121 [Na^+] + [Cl^- \text{ perdu}]$$

$$\text{soit encore} \quad [SO_4^{-- \star} \text{ ex.}] = [SO_4^{--}] + [Cl^-] - 1,29 [Na^+] \quad (15)$$

4.5. CONCLUSIONS

Notre étude du budget ionique des couches de neige de surface a montré que la majeure partie des impuretés solubles était constituée de sodium et de chlore, mais surtout de protons liés au nitrate et au sulfate, l'ammonium restant constamment un composé mineur.

La balance ionique a pu être équilibrée sur près de cinq cents échantillons de neige, ce qui a permis de mettre en évidence la présence constante de sel de mer, d'acide nitrique et d'acide sulfurique.

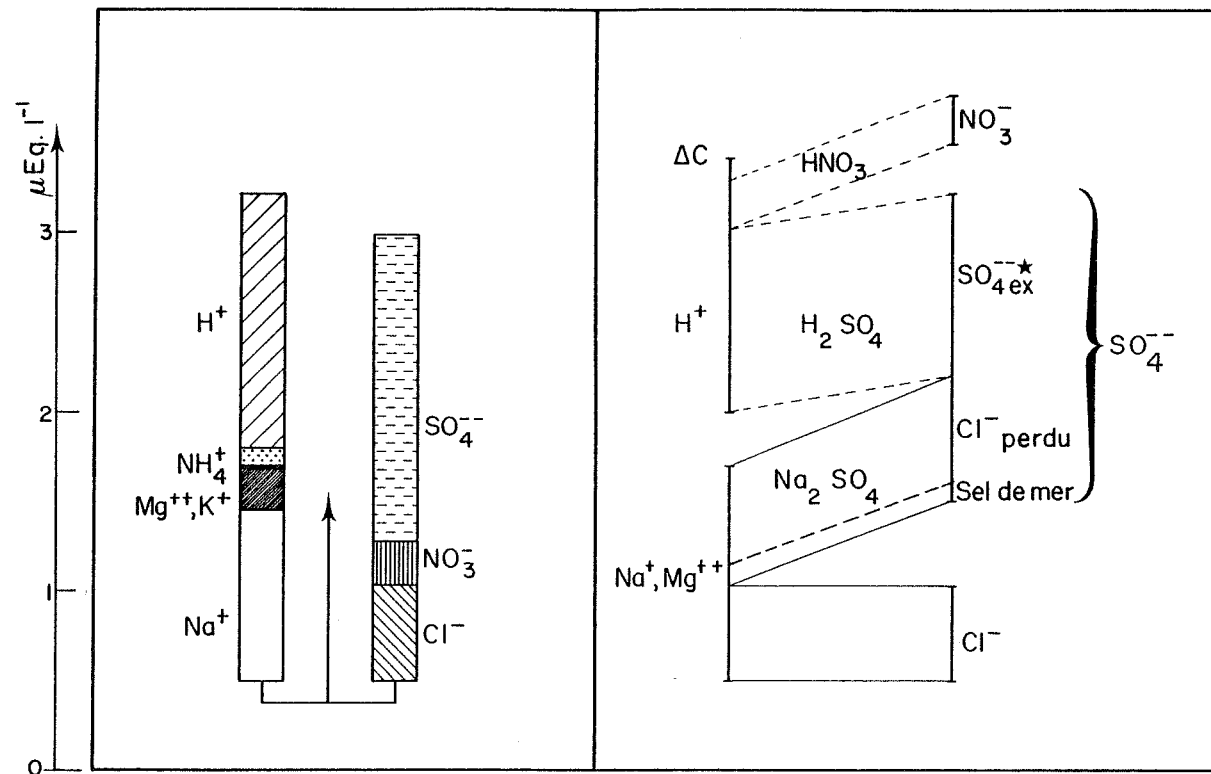


Figure 26 : Constitution moyenne de la partie soluble et diagramme de reconstitution de l'acidité au Dôme C sur la période 1860-1880.

Dans le cas où le rapport $\text{Cl}/_{\text{Na}}$ mesuré dans la neige est supérieur à 1,8, nous avons identifié un troisième acide minéral, l'acide chlorhydrique; à l'inverse, lorsque le rapport $\text{Cl}/_{\text{Na}}$ est inférieur à 1,8, nous avons conclu à la présence d'un sel de mer partiellement appauvri en chlore et enrichi en sulfate.

Les origines du proton ont pu être reliées aux seuls acides minéraux (HNO_3 , H_2SO_4 et parfois HCl) présents dans des proportions d'ailleurs très variables d'un site à l'autre; la contribution des acides organiques restant faible.

Nous verrons ultérieurement l'importance de ces résultats pour la compréhension de la chimie atmosphérique.

5 - BILAN ET RECONSTITUTION DES COMPOSES : CAS DE LA DERNIERE GLACIATION

5.1. PROBLEME LIE A LA PRESENCE IMPORTANTE D'ALUMINO-SILICATES

Afin d'étudier les éventuelles modifications de l'environnement atmosphérique passé de la terre, nous avons mené la même étude que précédemment sur quatre forages (Dôme C, Vostok, D 10 et Byrd) couvrant une période de temps de plusieurs milliers d'années, incluant ainsi le grand changement climatique survenu il y a 15 000 ans.

Lors d'une première étude portant sur la carotte de 950 m de Vostok, nous avons obtenu une balance ionique franchement déséquilibrée sur certains échantillons (De Angelis et al. 1984). Ce phénomène a attiré notre attention et nous a décidé à revoir la question. Certes, la différence constatée entre les cations (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , H^+ mesurés et Mg^{++} estimé par l'équation (4)) et les anions (Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--} mesurés) ne représente guère plus de 15% de la charge ionique Σ (calculée avec l'équation (3)), mais elle est systématiquement négative et surtout semble bien corrélée aux teneurs en aluminium (voir figure 29). Ainsi les fortes teneurs en aluminium (indiquant la présence de quantités importantes de matière d'origine terrigène) sont venues apparemment perturber de manière significative la balance ionique de ces échantillons de glace âgés de 18 000 ans environ.

Les alumino-silicates, qui représentent une part importante des poussières d'origine terrigène, sont constitués d'une matrice silice-aluminium dans laquelle se trouvent insérés divers cations, en particulier Na^+ , K^+ , Ca^{++} et Mg^{++} . Des considérations de chimie structurale montrent que si la matrice ne peut guère libérer d'ions en présence d'eau, les cations en raison du caractère fragile des liaisons qui les lient à la matrice, peuvent plus ou moins facilement s'échanger avec des protons en milieux aqueux, suivant le schéma réactionnel :

$$\text{Cation-Al-silicate} + \text{H}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \xrightleftharpoons[(1)]{(2)} \text{HCO}_3^- + \text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{cation} + \text{Al-silicate} \quad (\text{f})$$

(Stumm et Morgan, 1970).

L'échange entre les cations de l'alumino-silicate et les protons de l'eau sera facilité (déplacement de l'équilibre ci-dessus dans le sens (2)) par le caractère acide de l'eau. Nous ne pouvons donc pas a priori exclure l'hypothèse d'une dissolution partielle des poussières terrigènes au moment de la fusion de l'échantillon de glace. De plus, l'importante différence de pH entre l'eau de fusion des échantillons ($0 < [\text{H}^+] < 10 \mu\text{Eq.l}^{-1}$, soit $5,0 < \text{pH} < 5,6$) et l'éluant utilisé en chromatographie ionique pour analyser les cations (acide chlorhydrique à $5 \cdot 10^{-3} \text{N}$, soit $\text{pH} = 2,3$) peut entraîner une modification du comportement des alumino-silicates au moment où l'échantillon traverse la colonne de chromatographie ionique.

Pour parvenir à établir correctement la balance ionique de la précipitation en présence d'alumino-silicates, il apparaît nécessaire de bien savoir ce que l'on mesure par chromatographie ionique.

5.2. TESTS ANALYTIQUES

Un certain nombre de manipulations supplémentaires ont été nécessaires pour résoudre le problème lié à la possible interférence des poussières terrigènes sur la partie soluble des impuretés contenue dans la glace déposée il y a 18 000 ans. Les alumino-silicates de sodium étant a priori ceux pouvant poser le plus de problèmes parce qu'étant parmi les plus facilement altérables en milieu aqueux (Géologie des Argiles, Millot 1964) ; nous avons, outre la mesure habituelle des ions Na^+ , NH_4^+ , K^+ , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--} (par chromatographie ionique et titration acide), effectué des mesures de sodium et d'aluminium par activation neutronique sur une quarantaine de morceaux de glace du forage 905 m du Dôme C.

Rappelons que l'activation neutronique est une méthode d'analyse globale qui prendra en compte le sodium sous toutes ses formes (soluble ou insoluble). Nous avons alors comparé d'une part les valeurs obtenues par chromatographie ionique ($\text{Na}^+_{\text{C.I.}}$) et par l'activation neutronique ($\text{Na}^+_{\text{A.N.}}$), d'autre part les valeurs obtenues par chromatographie ionique et les valeurs de sodium marin (Na^+_m) évaluées par :

$$\text{Na}^+_m = \text{Na}^+_{\text{A.N.}} - \frac{23600}{82300} \cdot \text{Al} \quad (\text{en ng.g}^{-1}) \quad (16)$$

le rapport $\frac{23600}{82300}$ correspondant au rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Al}}$ dans la composition moyenne des roches crustales (Taylor, 1964).

La figure 27, ainsi que les corrélations obtenues entre les trois quantités $\text{Na}^+_{\text{C.I.}}$, $\text{Na}^+_{\text{A.N.}}$ et Na^+_m (voir ci-dessous) suggèrent que la chromatographie mesure le sodium total.

$$\left. \begin{aligned} \text{Na}^+_{\text{C.I.}} &= -2,8 + 0,99 \text{Na}^+_{\text{A.N.}} \\ \text{Na}^+_{\text{C.I.}} &= 6,5 + 1,28 \text{Na}^+_m \end{aligned} \right\} \quad (\text{en ng.g}^{-1})$$

L'analyse minéralogique des particules récoltées sur filtre nuclépore à 0,4 microns, après percolation de l'eau de fusion provenant de glace vieille de plus de 15 000 ans collectée au Dôme C et à Vostok (Petit, 1982, Petit et al. 1983), avait mis en évidence des feldspaths variés (sodi-potassiques, sodi-calciques) et même de l'albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Ces analyses suggèrent donc que le départ du sodium de l'alumino-silicate ne se produit pas à la fusion de l'échantillon, mais lors de l'analyse des cations, le sodium devenant alors plus vulnérable du fait de l'élution de l'échantillon à $\text{pH} = 2,3$.

Pour établir la balance ionique d'échantillons contenant des alumino-silicates, le ΔC utilisé (calculé par l'équation (5)) n'est pas correct puisque le sodium que nous mesurons ne correspond plus au sodium ionique du sel de mer.

D'autre part, la figure 27 montre que l'augmentation des teneurs en aluminium s'accompagne d'une augmentation de la teneur en impuretés d'origine marine et les teneurs en calcium ne sont plus négligeables.

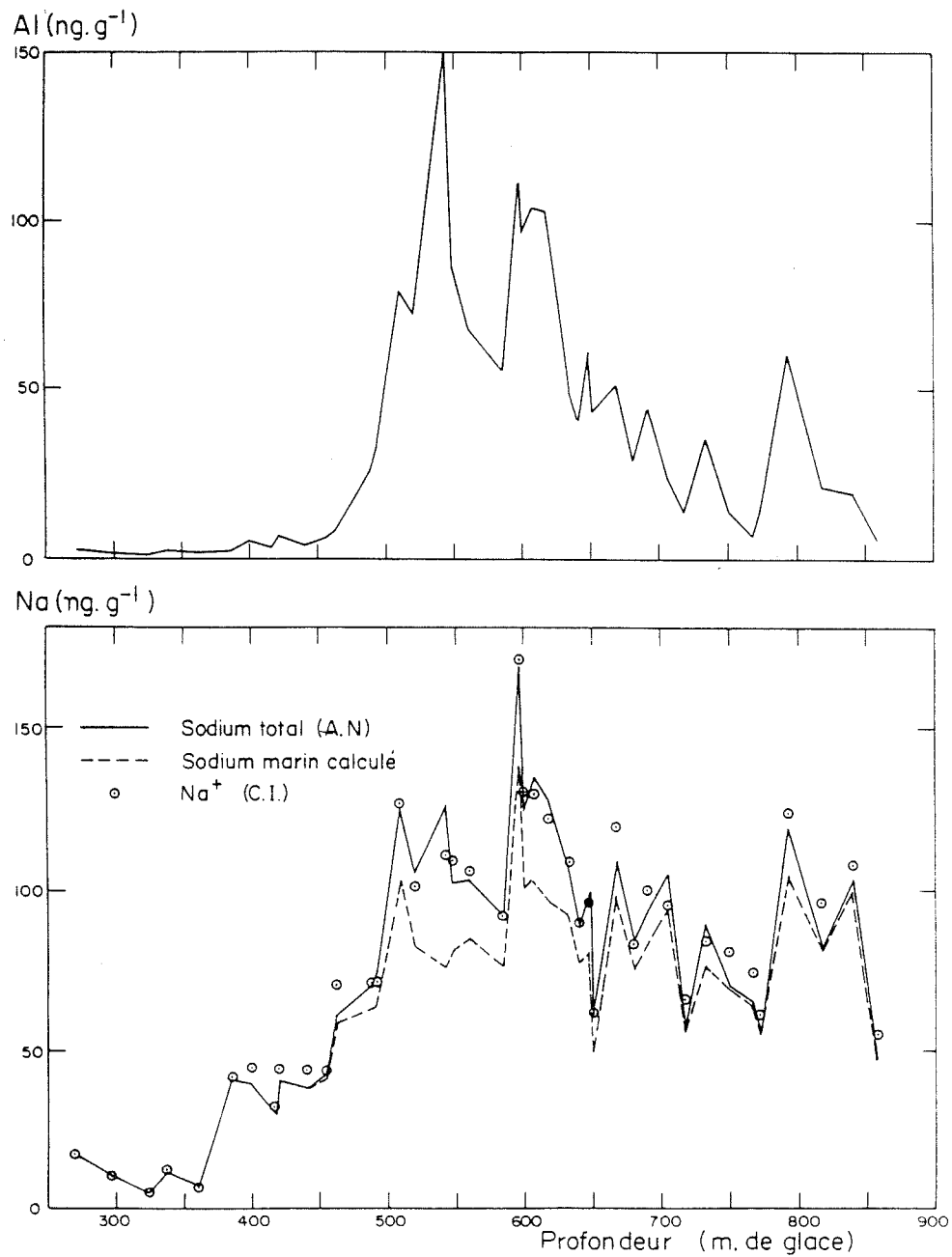


Figure 27 : Comparaison des teneurs en sodium obtenues par chromatographie ionique (C.I.) avec le sodium total et avec le sodium marin en fonction de la charge en poussières d'origine terrigène (Aluminium) le long de la carotte 905 m du Dôme C.

Compte tenu de ces deux observations, le déséquilibre entre les cations et les anions s'évalue par :

$$\Delta C_1 = [Na^+]_m + [Mg^{++}]_m + [Ca^{++}]_m + [NH_4^+] + [K^+] + [H^+] - [Cl^-] - [NO_3^-] - [SO_4^{--}] \quad (17)$$

avec

$$[Na^+]_m = [Na^+]_{C.I.} - \frac{23600}{82300 \times 23} \cdot Al \quad (\text{en } \mu\text{Eq.l}^{-1}) \quad (18)$$

$$[Mg^{++}]_m = 0,23 [Na^+]_m \quad (4)$$

$$\text{et } [Ca^{++}]_m = 0,044 [Na^+]_m \quad (\text{voir tableau 7}), \quad (19).$$

L'évaluation du déséquilibre ΔC_1 nécessite donc la connaissance des teneurs en aluminium.

Pour la carotte du Dôme C et celle de Vostok, ce paramètre a été mesuré sur tous nos échantillons par activation neutronique. Pour ces deux sites, nous obtenons un déséquilibre ΔC_1 négatif (0 à $6\mu\text{Eq.l}^{-1}$) sur les échantillons présentant des teneurs en aluminium supérieures à $10-20 \text{ ng.g}^{-1}$ (Dôme C, voir figure 28, Vostok, voir figure 29). Dans le cas de Byrd et de D 10, nous ne connaissons pas la teneur en aluminium de nos échantillons. Nous avons néanmoins pu calculer les quantités Na^+_m (équation (18)) et ΔC_1 (équation (17)) avec des valeurs moyennes d'aluminium obtenues à Byrd par Cragin et al. 1977 (figure 31) et à D 10 par De Angelis et Legrand (en préparation) (figure 30). Pour ces deux carottes, les poussières terrigènes sont dix fois moins importantes que pour celle de Vostok et de Dôme C, le déséquilibre calculé (ΔC_1) devenant néanmoins négatif (0 à $1\mu\text{Eq.l}^{-1}$) lorsque les teneurs en aluminium atteignent 10 à 15 ng.g^{-1} (figures 30 et 31).

Afin d'équilibrer totalement la balance ionique de cette glace, nous avons du pousser plus avant nos investigations concernant la contribution éventuelle des impuretés d'origine terrigène à la partie soluble des impuretés.

Un échantillon pris à 541 mètres (profondeur en m de glace) dans la carotte 905 mètres du Dôme C a été décontaminé par lavage à l'eau ultra-pure suivant la méthode décrite au paragraphe 4.3.3. (Chapitre 1).

L'eau de fusion de la partie centrale de l'échantillon a ensuite été filtrée sur filtre Nucléopore à 0,4 microns.

Les teneurs en sodium, potassium, calcium, magnésium et aluminium ont été mesurées sur le filtrat et sur l'eau de fusion initiale, par différentes techniques : l'absorption atomique (A.A.), l'activation neutronique (A.N.) et la chromatographie ionique (C.I.).

Une partie du sodium (18 ng.g^{-1} , soit 17%), du potassium (37 ng.g^{-1} , soit 87%), du magnésium (61 ng.g^{-1} , soit 77%) et du calcium (20 ng.g^{-1} , soit 30%) est retenue sur le filtre avec la presque totalité de l'aluminium (95%) (voir tableau 11). Le fait que la teneur en sodium soit plus importante dans l'échantillon total que dans le filtrat confirme bien que la fraction de sodium d'origine terrigène est insoluble dans l'eau; par contre le bon accord entre les valeurs obtenues par chromatographie ionique et par activation neutronique sur l'échantillon total démontre, comme cela a été suggéré plus haut, que cette fraction terrigène du sodium quitte les alumino-silicates au moment de la mesure par chromatographie ionique.

Pour le potassium, le magnésium et le calcium, nous n'avons pas observé de différence (par chromatographie ionique) entre le filtrat et l'échantillon total. D'autre part, pour ces trois éléments, les teneurs obtenues dans le filtrat sont beaucoup plus importantes que celles attendues et ne peuvent en particulier pas s'expliquer par la seule contribution marine (voir tableau 11).

Ces excès par rapport à l'eau de mer ne peuvent pas être expliqués par un début de solubilisation des alumino-silicates au moment de la fusion car, si tel était le cas, nous aurions dû observer une augmentation de ces excès lors de la mesure par chromatographie ionique de l'échantillon total, ce qui n'est pas le cas (voir tableau 11).

L'ensemble de ces tests nous permet de conclure que :

- Le sodium mesuré par chromatographie ionique ne correspond en fait pas au sodium présent à l'état ionique dans l'eau de fusion. Pour établir la balance ionique, la teneur en sodium obtenue doit être corrigée de la contribution terrigène par l'équation (18); cela nécessite la connaissance de la teneur en aluminium.

	Sodium (Na) (ng.g ⁻¹)		Potassium (K) (ng.g ⁻¹)		Magnésium (Mg) (ng.g ⁻¹)		Calcium (Ca) (ng.g ⁻¹)		Aluminium (Al) (ng.g ⁻¹)
Total	A.N. 107	C.I. 110	A.A. 45	C.I. 8	A.A. 79	C.I. 17,5	A.A. 67	C.I. 47	A.N. 106
Filtrat	A.N. 89	C.I. 92	A.A. 8,2	C.I. 8	A.A. 17	C.I. 16,5	A.A. 48,5	C.I. 45	A.N. 5,3
Marin attendu	78,1 < Na _m ⁺ < 90,5		2,9 < K _m ⁺ < 3,3		9,4 < Mg _m ⁺⁺ < 10,9		3,0 < Ca _m ⁺⁺ < 3,4		-
Excès dans le filtrat	-		5,0 ± 0,2		6,6 ± 0,8		43,8 ± 0,2		-

Tableau 11 : Evaluation de la contribution des impuretés d'origine terrigène à la partie soluble sur un échantillon à 574 m de la carotte du Dôme C : la teneur en sodium marin a été estimée d'après la teneur en sodium du filtrat d'une part, à partir de l'équation (18) et du sodium total d'autre part.

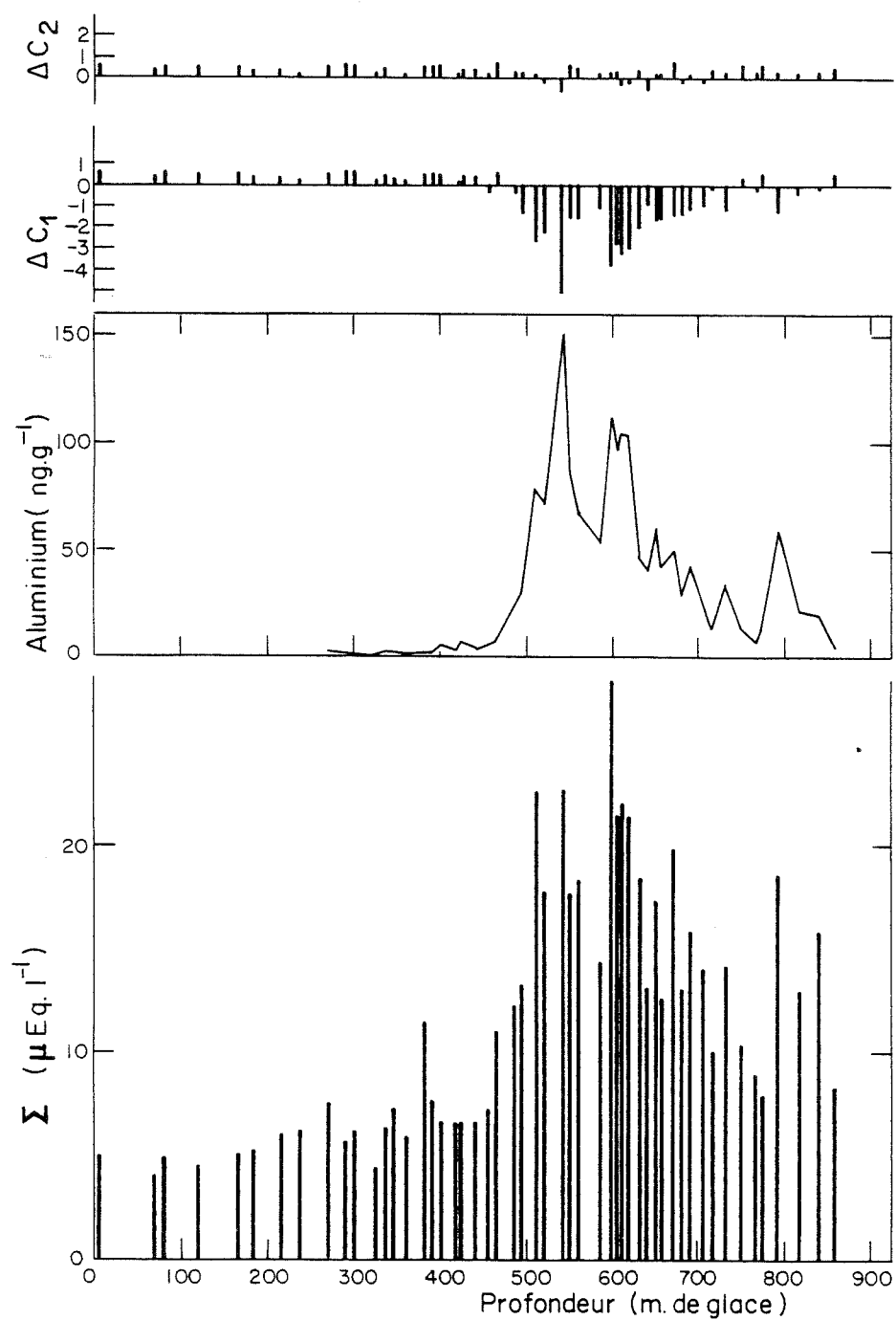


Figure 28 : Evolution de la charge ionique (Σ) et du déséquilibre entre cations et anions (ΔC_1 et ΔC_2 , voir texte) en fonction de la teneur en aluminium sur la carotte du Dôme C.

La présence de magnésium et de calcium à l'état ionique en excès par rapport à l'eau de mer oblige à les mesurer et non plus à les calculer à partir du sodium marin, comme cela a été fait pour les échantillons de surface.

La balance ionique entre cations et anions s'écrit alors :

$$\Delta C_2 = [Na^+]_m + [NH_4^+] + [K^+] + [Mg^{++}] + [Ca^{++}] + [H^+] - [Cl^-] - [NO_3^-] - [SO_4^{--}] \quad (20)$$

$$\text{avec } [Na^+]_m = [Na^+] - \frac{23600}{82300 \times 23} \cdot Al \quad (18)$$

5.3. BALANCE IONIQUE DE LA GLACE D'IL Y A 18000 ANS

Pour la carotte du Dôme C où nous avons pu mesurer l'aluminium, le calcium et le magnésium sur nos échantillons, le déséquilibre entre les cations et les anions ainsi obtenu (ΔC_2 , voir figure 28) est alors remarquablement faible.

Pour la carotte de Vostok, nous avons mesuré l'aluminium mais non le calcium, ni le magnésium. Nous avons néanmoins pu estimer ces deux quantités à partir du rapport $\frac{[Ca^{++}]_{ex} + [Mg^{++}]_{ex}}{Al}$ obtenu sur les échantillons du Dôme C

($0,031 \pm 0,007$, voir tableau A2.38). La quantité ΔC_2 ainsi estimée devient dans ce cas également voisine de zéro (voir figure 29). Pour les échantillons de D 10, nous avons mesuré le calcium et le magnésium, l'aluminium ayant lui été estimé à partir du profil obtenu par De Angelis et Legrand sur d'autres échantillons (voir figure 30). Pour les échantillons de Byrd, nous avons estimé l'aluminium à partir du profil obtenu par Cragin et al. 1977, puis le calcium et le magnésium à partir du rapport précédent ($0,031$), (voir figure 31).

5.4. IDENTIFICATION DES COMPOSES CHIMIQUES PRESENTS DANS LA GLACE D'IL Y A 18000 ANS

A partir de la balance ionique bien équilibrée, nous avons essayé comme pour la neige de surface, de déterminer sous quelle forme chimique sont présents les différents ions. Nous allons traiter le cas de la glace du Dôme C où les teneurs en poussières d'origine terrigène sont particulièrement importantes. La composition moyenne de la partie soluble des impuretés obtenue sur les échantillons de la carotte du Dôme C compris entre 510 et 680 mètres de profondeur (en m de glace), période durant laquelle les teneurs en aluminium atteignent plusieurs dizaines de $ng.g^{-1}$ (en moyenne $75 \pm 32 ng.g^{-1}$) est présentée sur la figure 32.

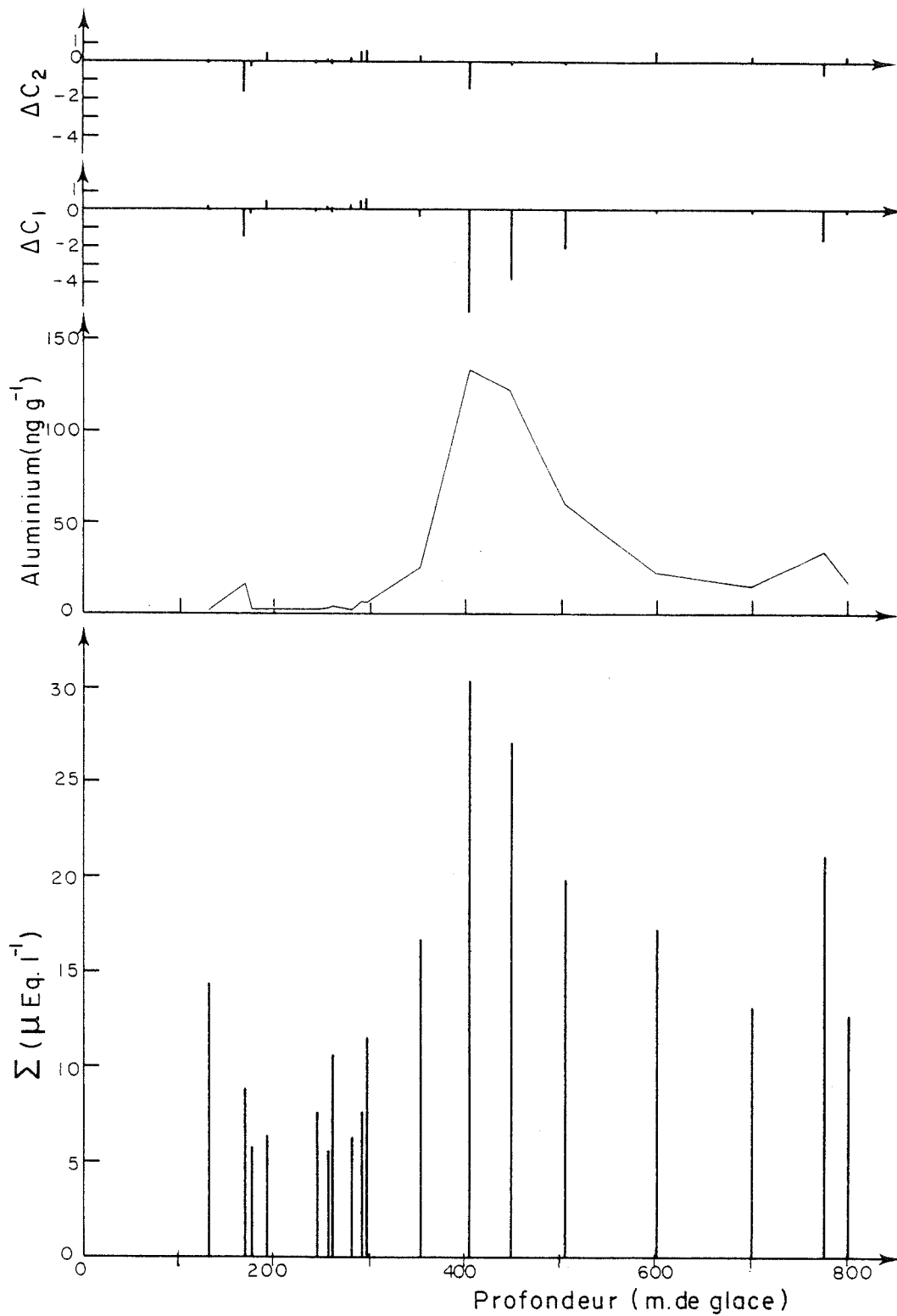


Figure 29 : Evolution de la charge ionique (Σ) et du déséquilibre entre cations et anions (ΔC_1 et ΔC_2 , voir texte) en fonction de la teneur en aluminium sur la carotte 950 m de Vostok.

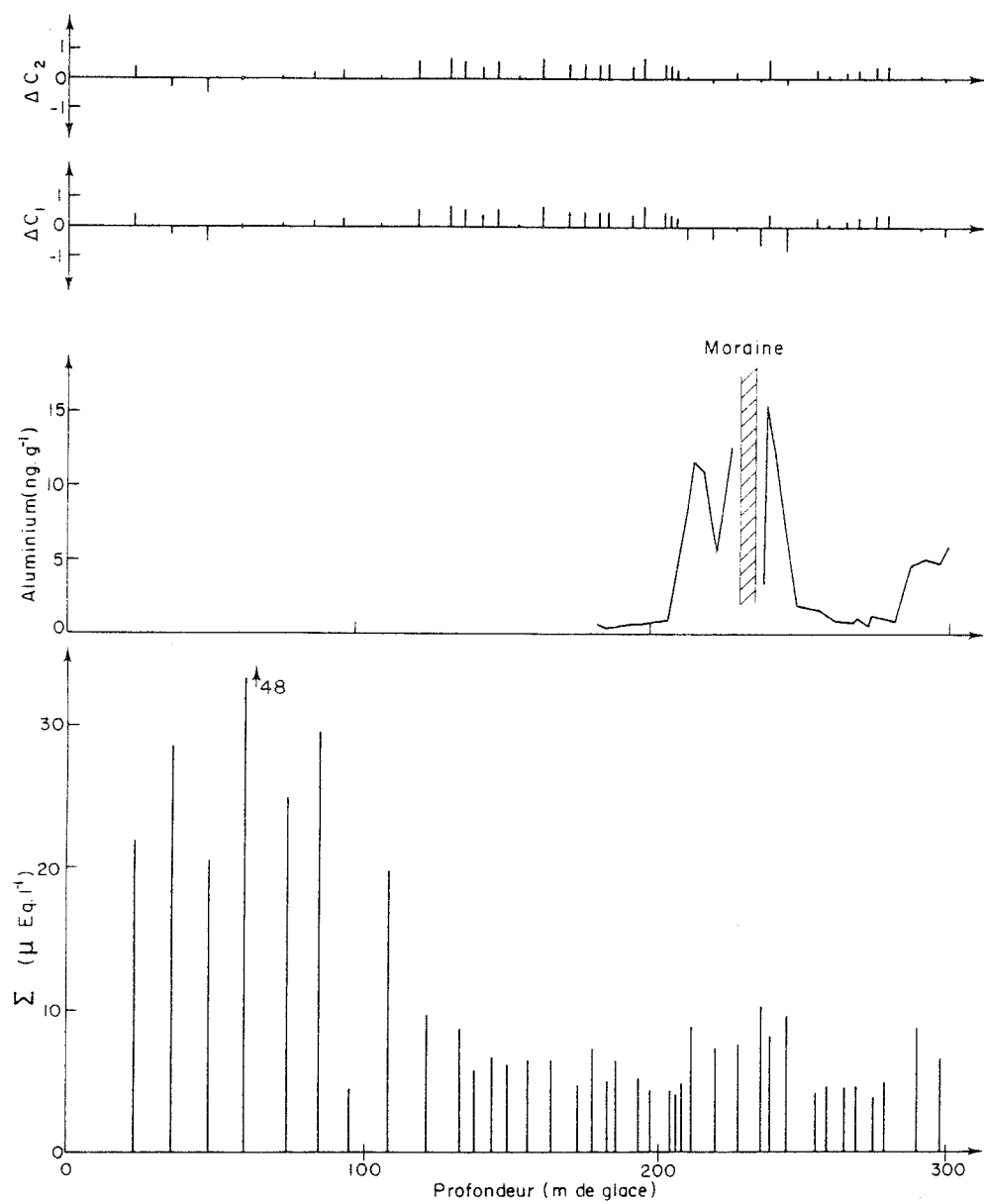


Figure 30 : Charge ionique (Σ), déséquilibre (ΔC_1 puis ΔC_2 , voir texte), teneur en aluminium (d'après de Angelis et Legrand, en préparation) sur la carotte de D 10.

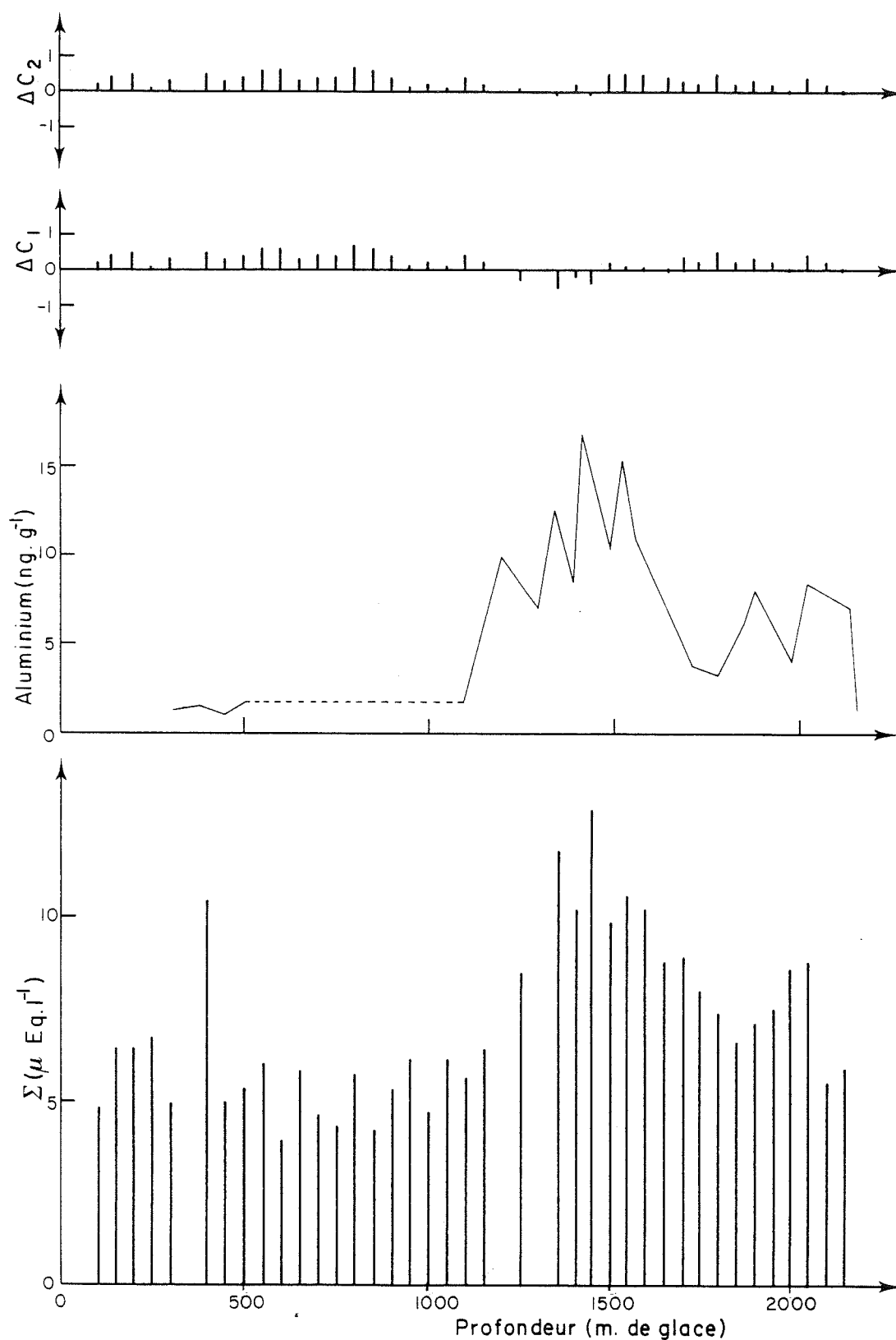


Figure 31 : Charge ionique (Σ), déséquilibre (ΔC_1 puis ΔC_2 , voir texte), et teneur en aluminium (d'après Cragin et al. 1977) sur la carotte de Byrd.

L'océan, et dans une moindre mesure les continents, peuvent être considérés comme les deux seules sources potentielles de sodium dans la précipitation antarctique. Le sodium corrigé de sa contribution terrigène (voir paragraphe précédent), est donc essentiellement d'origine marine comme le confirme d'ailleurs le rapport Cl/Na très voisin du rapport de l'eau de mer obtenu sur ces seize échantillons ($1,87 \pm 0,28$).

La balance ionique équilibrée ($\Delta C_2 = 0$) se traduit par l'équation :

$$[\text{Na}^+]_m + [\text{NH}_4^+] + [\text{K}^+] + [\text{Ca}^{++}] + [\text{Mg}^{++}] + [\text{H}^+] = [\text{Cl}^-] + [\text{NO}_3^-] + [\text{SO}_4^{--}] \quad (21)$$

En soustrayant toute la contribution du sel de mer à cette équation, il vient :

$$[\text{NH}_4^+] + [\text{H}^+] + [\text{Ca}^{++}] - 0,044 [\text{Na}^+]_m + [\text{Mg}^{++}] - 0,23 [\text{Na}^+]_m + [\text{K}^+] - 0,022 [\text{Na}^+]_m = [\text{Cl}^-] - 1,18 [\text{Na}^+]_m + [\text{NO}_3^-] + [\text{SO}_4^{--}] - 0,121 [\text{Na}^+]_m \quad (22)$$

D'après l'équation (1) nous obtenons :

$$[\text{NH}_4^+] + [\text{H}^+] + [\text{Ca}^{++}]_{\text{ex.}} + [\text{Mg}^{++}]_{\text{ex.}} + [\text{K}^+]_{\text{ex.}} = [\text{Cl}^-]_{\text{ex.}} + [\text{NO}_3^-] + [\text{SO}_4^{--}]_{\text{ex.}} \quad (23)$$

Le tableau 12 montre que nous pouvons négliger les quantités NH_4^+ , K^+ et Cl^- ex.

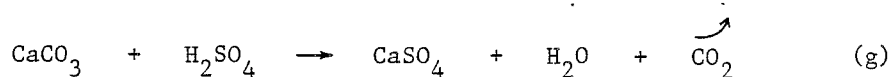
L'équation 23 se réduit donc à :

$$[\text{H}^+] + [\text{Ca}^{++}]_{\text{ex.}} + [\text{Mg}^{++}]_{\text{ex.}} = [\text{NO}_3^-] + [\text{SO}_4^{--}]_{\text{ex.}} \quad (24)$$

La bonne corrélation entre les excès de calcium (et de magnésium) et la teneur en aluminium de nos échantillons suggère une origine essentiellement terrigène pour ces deux ions ($\text{Mg}^{++}_{\text{ex.}} = 1,9 + 0,07.\text{Al}$ avec $r = 0,80$; $\text{Ca}^{++}_{\text{ex.}} = 5 + 0,38.\text{Al}$ avec $r = 0,93$).

Parmi les composés solubles émis par les continents, les carbonates et les sulfates sont les plus fréquemment rencontrés.

Le bilan ionique ne permet plus à lui seul de faire la différence entre la présence dans la neige de sulfate de calcium et la présence d'un mélange d'acide sulfurique et de carbonate de calcium. En effet pour ce dernier cas de figure, la fusion de l'échantillon s'accompagnera d'une réaction de neutralisation des carbonates par l'acide sulfurique :



Na^+_{m}	Ca^{++}	Mg^{++}	NH_4^+	K^+	H^+	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{--}	$\text{Cl}/\text{Na}_{\text{m}}$	ΔC	Σ	A1
3,85 $\pm 0,84$	1,88 $\pm 0,69$	1,52 $\pm 0,40$	0,12 $\pm 0,07$	0,16 $\pm 0,04$	1,91 $\pm 0,43$	4,66 $\pm 1,01$	0,65 $\pm 0,25$	4,03 $\pm 1,15$	1,87 $\pm 0,28$	0,04 $\pm 0,39$	18,7 $\pm 4,2$	75 ± 32
Excès par rap- port au marin	1,71 $\pm 0,67$	0,64 $\pm 0,25$	-	0,08	-	0,12	-	3,56 $\pm 0,98$	-	-	-	-

Tableau 12 : Constitution moyenne de la partie soluble des impuretés contenue dans les échantillons compris entre 510 et 680 mètres (profondeur en glace) au Dôme C.

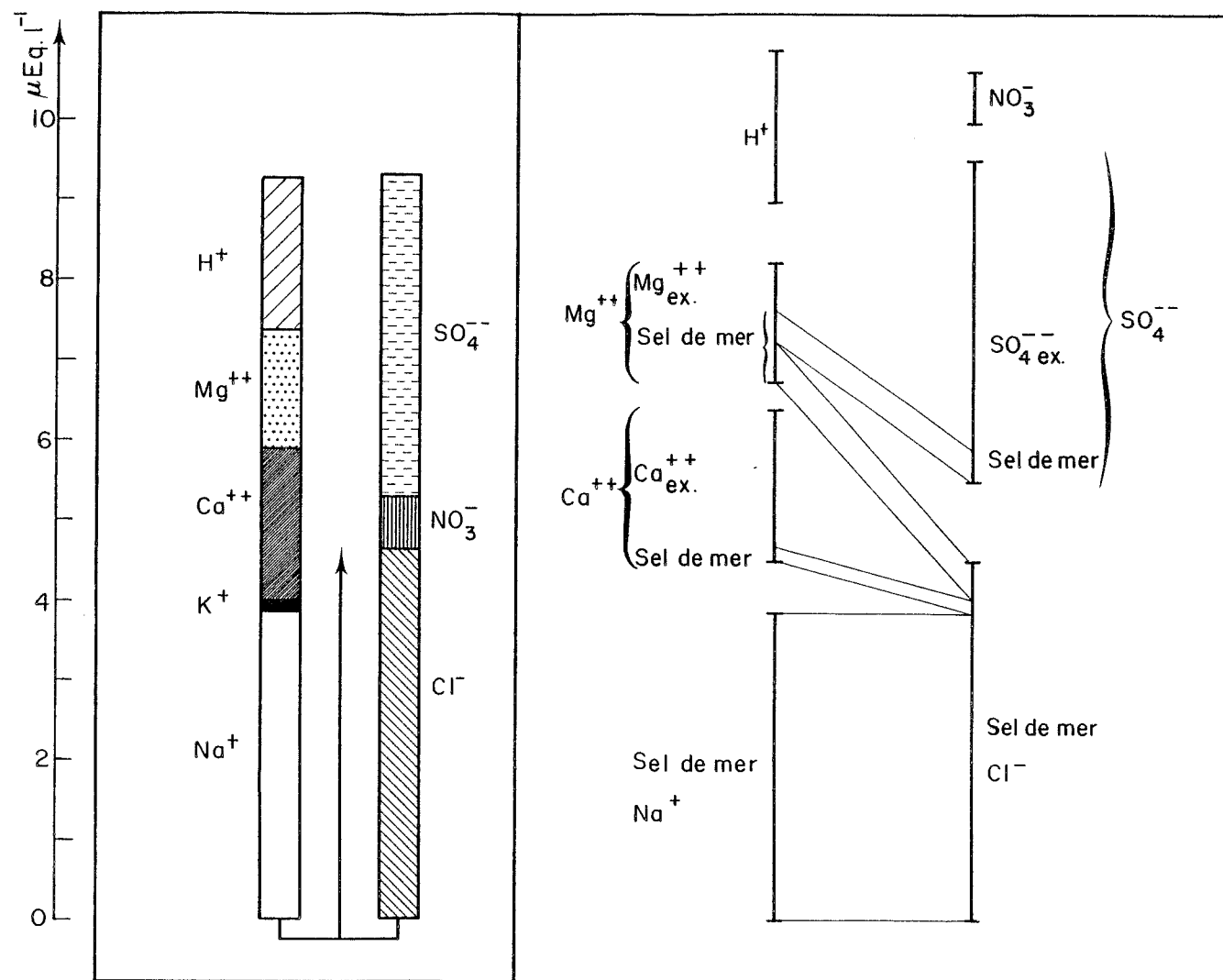


Figure 32 : Constitution moyenne de la partie soluble pour les échantillons pris entre 510 et 680 mètres dans la carotte 905 m du Dôme C.

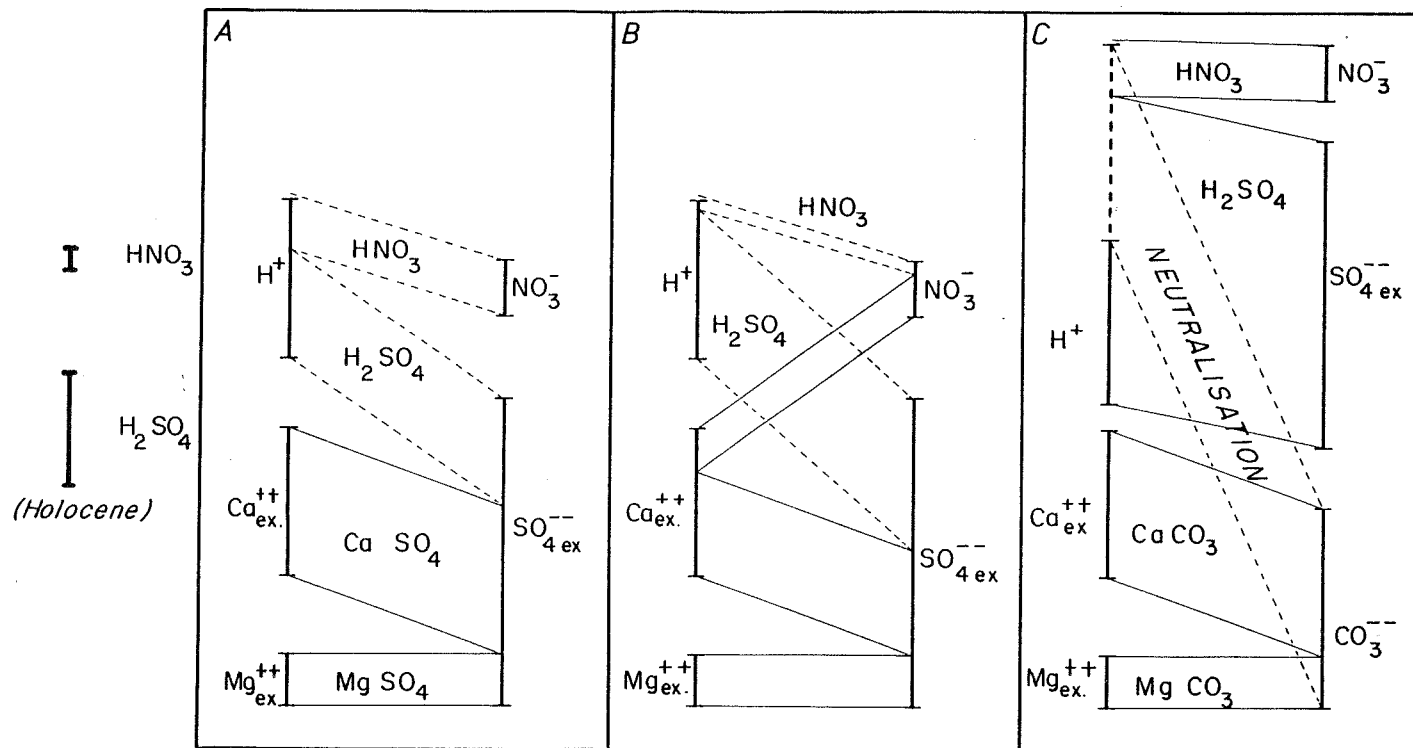


Figure 33 : Les trois reconstitutions possibles de l'acidité de la glace (entre 510 et 680 m au Dôme C) :

- A : $\text{Ca}^{++}_{\text{ex}}$ et $\text{Mg}^{++}_{\text{ex}}$ sont exclusivement présents sous forme de sulfate.
- B : $\text{Ca}^{++}_{\text{ex}}$ et $\text{Mg}^{++}_{\text{ex}}$ sont des sulfates et des nitrates.
- C : $\text{Ca}^{++}_{\text{ex}}$ et $\text{Mg}^{++}_{\text{ex}}$ sont des carbonates.

S'il existe des carbonates dans la glace, la réaction précédente montre que la fusion de l'échantillon va s'accompagner d'une libération de gaz carbonique. La mesure de la teneur en gaz carbonique a été réalisée sur des échantillons de la carotte du Dôme C (Delmas et al. 1980) de deux manières :

- par "voie sèche" : extraction du gaz carbonique par broyage à froid de la glace, cette mesure tenant compte uniquement du gaz carbonique contenu dans les bulles d'air,
- par "voie humide" : extraction du gaz carbonique par fusion et regel successif de l'échantillon, cette méthode prenant en compte non seulement le gaz carbonique des bulles d'air mais aussi le gaz carbonique pouvant provenir de la matrice glace ou de la décomposition des carbonates.

Les mesures réalisées par Delmas et al. (1980) mettent en évidence des teneurs plus élevées par "voie humide" que par "voie sèche" sur toutes les carottes (voir figure 34).

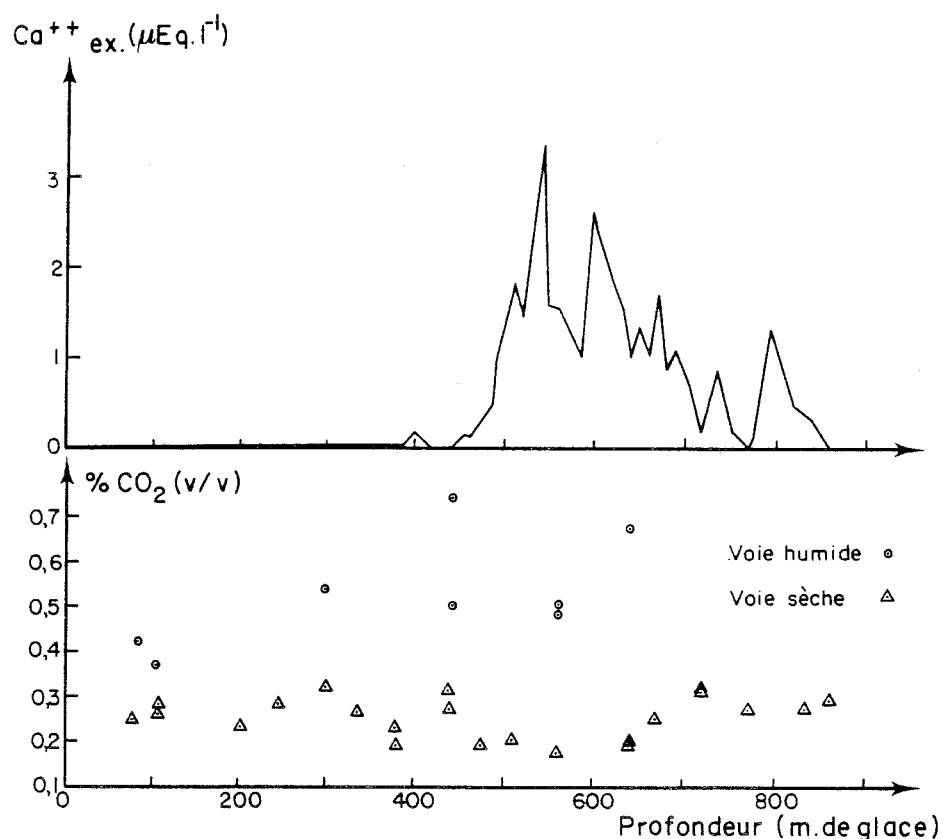


Figure 34: Variations de l'excès de calcium (ce travail) et des teneurs en gaz carbonique mesurées par "voie humide et par voie "sèche" (Delmas et al. 1980) le long de la carotte 905m du Dôme C.

Nous pensons que cette différence entre les deux séries de mesure s'interprète par une contamination résiduelle des carottes par des carbonates des poussières ambiantes (comme cela a d'ailleurs été suggéré dans l'article en question) plutôt que par la présence de carbonates naturels (les problèmes de contamination des carottes de glace étaient encore relativement mal cernés à cette époque).

Ces résultats déjà anciens ne nous permettent donc pas de répondre à la question "Y a-t-il des carbonates dans la matrice glace lorsque les teneurs en poussières terrigènes sont très importantes ?"

Pour effectuer des mesures de la teneur en gaz carbonique, il n'est pas possible d'éliminer la partie externe des carottes par la méthode de fusion-lavage décrite au paragraphe 4.3.3. Chapitre 1, car l'eau ultrapure en équilibre avec le gaz carbonique atmosphérique risquerait d'introduire sur la surface de l'échantillon ou même à l'intérieur par les fractures, des quantités significatives de CO_2 . Pour avancer sur cette question de la présence ou non de carbonates naturels, un morceau de glace pris à 541 m (en mètre de glace) dans la carotte du Dôme C a été décontaminé à froid (-15°C) de la manière suivante :

- . Elimination de la partie externe de la carotte à l'aide d'une scie téflonnée, prénettoyée à l'eau ultrapure.
- . Elimination de la contamination alors introduite sur la scie téflonnée en sciant une dizaine de fois des blocs de glace, obtenus par congélation d'eau ultrapure dans de la gaine propre.
- . Elimination de la nouvelle partie externe de l'échantillon à l'aide de la scie téflonnée.
- . Enfin, élimination de la partie externe à l'aide d'une scie à ruban prénettoyée à l'alcool puis avec de la glace artificielle ultrapure.
- . L'ensemble de ces opérations est effectué à -15°C par deux opérateurs avec les précautions d'usage : port du masque, gants propres renouvelés entre chaque étape de la décontamination, échantillon déposé sur de la gaine propre quand cela était nécessaire.

Sur une portion de l'échantillon ainsi obtenu, nous avons mesuré la teneur en calcium et en magnésium ($\text{Ca}^{++} = 45 \text{ ng.g}^{-1}$ et $\text{Mg}^{++} = 18 \text{ ng.g}^{-1}$) l'autre portion ayant servi à la mesure de la teneur en CO_2 par la méthode fusion-regel, dans une gamelle préalablement nettoyée en chambre sans poussière. La valeur de la teneur en CO_2 ainsi obtenue par "voie humide" n'a pas montré de différence significative avec les valeurs obtenues par "extraction sèche" par Delmas et al. 1980 et les valeurs obtenues par Barnola, 1984.

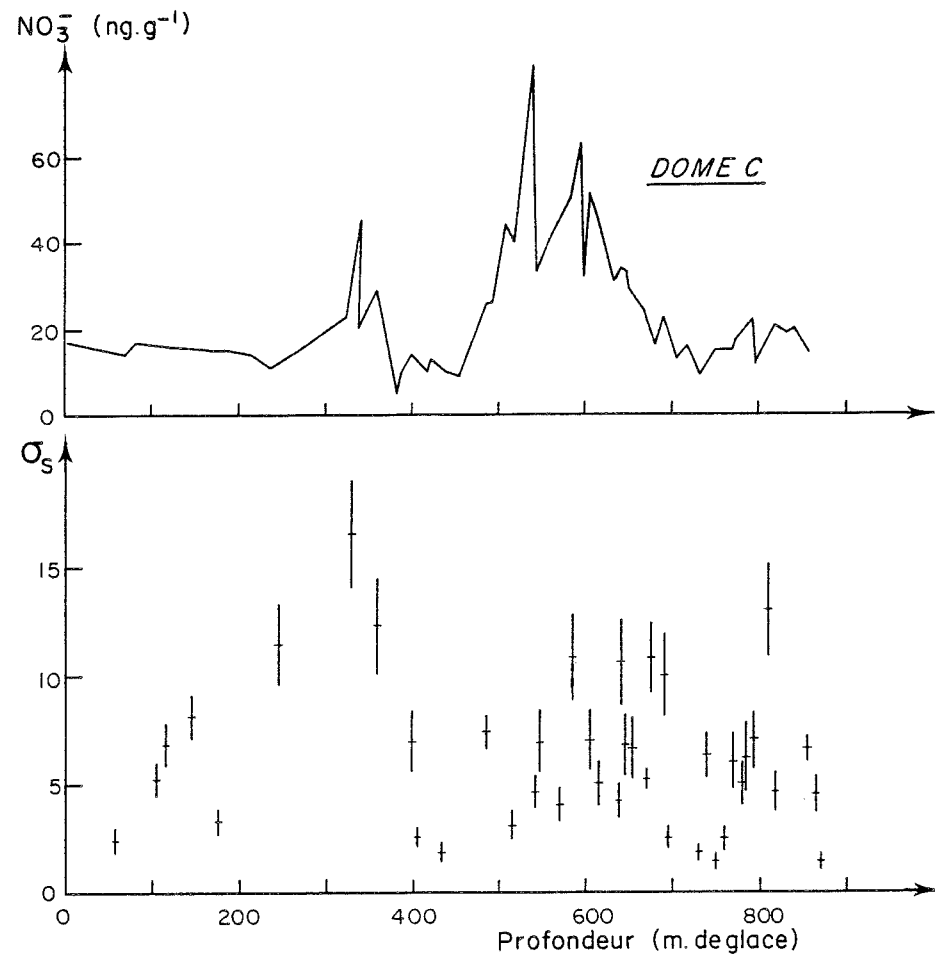


Figure 35 : Variations de la teneur en nitrate (ce travail) et de la conducti
"solide" (Maccagnan, 1981) le long de la carotte du Dôme C.

Cette expérience nous permet d'écarter l'hypothèse de la présence dans la glace antarctique de carbonate de calcium (CaCO_3) naturel. En conséquence, nous sommes aussi amenés à rejeter l'idée d'une neutralisation partielle de l'acidité naturelle de la glace par des carbonates. Deux autres cas de figure sont envisageables (figure 33).

- Les quantités de calcium et de magnésium en excès par rapport au sel de mer sont présentes dans la glace sous forme de sulfate, ce qui impliquerait alors que la teneur en acide nitrique a augmenté de manière significative entre la période Holocène et cette période (voir figure 33, cas A).

- Les quantités de calcium et de magnésium dans la neige sont associées en partie à des nitrates, en partie à des sulfates (figure 33, cas B).

Dans une récente étude portant sur la mesure de la conductivité électrique des glaces polaires, Zanolini (1982) a montré le rôle prépondérant de l'acide nitrique sur les signaux conductimétriques. Zanolini avait en particulier pu interpréter les valeurs élevées de conductivité solide, obtenues par Maccagnan (1981) entre 250 et 350 m dans la carotte du Dôme C (voir figure 35), comme étant liées à une augmentation de l'acide nitrique et non pas de l'acide sulfurique.

Nos mesures montrent qu'entre 510 et 680 mètres les fortes valeurs de nitrate observées, plus élevées encore qu'à 350 mètres (figure 35), ne correspondent pas à des valeurs élevées de la conductivité "solide".

Cette observation suggère qu'en fait l'augmentation des nitrates entre 510 et 680 mètres ne résulte pas d'une augmentation de la teneur en acide nitrique mais en celle d'un sel neutre. La bonne corrélation entre le nitrate et l'aluminium durant cette période ($\text{NO}_3^- = 9,1 + 0,4 \text{ Al}$ avec $r = 0,85$) semble en effet mettre en évidence une contribution terrigène de nitrate. Nous pensons donc que les excès de calcium et de magnésium par rapport au sel de mer sont présents dans la neige à l'état de sulfate et de nitrate (voir schéma B, figure 33).

5.5. CONCLUSIONS

Cette étude de la glace vieille de 18000 ans a montré que la chimie de la précipitation était beaucoup plus complexe qu'actuellement par suite d'une présence devenue très importante d'impuretés d'origine terrigène. Outre les poussières insolubles, cette glace contient des quantités importantes de sels (sel de mer, mais aussi nitrate et sulfate de calcium et de magnésium d'origine terrigène), les deux acides minéraux (HNO_3 et H_2SO_4 essentiellement) représentant une contribution relative beaucoup plus modeste que dans la neige récente.

C H A P I T R E I V

GLACIOCHIMIE DE LA NEIGE SOUS LES CONDITIONS

CLIMATIQUES ACTUELLES

1 - INTRODUCTION

La géochimie de la précipitation est l'étude des informations chimiques enregistrées dans les couches de neige et de glace, en relation avec la composition de l'atmosphère. L'étude globale de la partie soluble des impuretés (chapitre 3) a montré que dans les conditions climatiques actuelles, la neige contenait essentiellement du sel de mer et des acides minéraux (H_2SO_4 , HNO_3 et parfois HCl). Lorsqu'on quitte les régions côtières en direction de l'intérieur du continent antarctique, la contribution du sel de mer s'affaiblit considérablement, la partie soluble des impuretés étant alors dominée par ces trois acides minéraux, dans des proportions d'ailleurs variables d'un site à l'autre (paragraphe 4.3., chapitre 3).

Dans les régions tempérées, l'acidité atmosphérique fait l'objet actuellement de très nombreuses études en relation avec le problème de la pollution du type "pluies acides". Il est maintenant bien établi que cette acidité est surtout due à la présence d'acide nitrique et sulfurique. La contribution d'autres acides tels que les acides chlorhydrique, fluorhydrique et même organiques a également été suggérée. Les origines de ces acides sont variées : l'activité biogénique dans les océans et sur les continents, les volcans, les éclairs et maintenant l'activité humaine. En outre, ces composés acides peuvent être partiellement neutralisés par des composés basiques comme l'ammoniac (NH_3) et les carbonates. Cet aérosol acide provient essentiellement de la transformation dans l'atmosphère de composés gazeux (SO_2 , NO_x , NH_3 , composés organochlorés...). C'est ce qu'on appelle l'aérosol secondaire. Les mécanismes physico-chimiques mis en jeu, parfois complexes, ne sont pas encore élucidés dans leur totalité.

Le cas de l'aérosol antarctique devrait être moins compliqué car l'influence de certaines sources d'aérosols se trouve fortement atténuée par suite de la position privilégiée de ce continent, éloigné de toute activité humaine et des continents (et même des océans pour les régions les plus centrales). C'est ainsi que l'aérosol des régions centrales de l'Antarctique devrait en quelque sorte constituer le "bruit de fond de l'aérosol atmosphérique" (Cunningham et Zoller, 1981, Delmas et Gravenhorst, 1982), d'où son intérêt.

Dans cette partie, nous étudions la composition chimique des impuretés contenues dans la neige avec en particulier ses variations géographiques à la surface du continent antarctique et ses fluctuations au cours du temps à l'échelle de quelques dizaines à quelques milliers d'années. Nous nous limiterons volontairement à la période des dix mille dernières années qui correspond aux conditions climatiques actuelles. En effet, la chimie de la neige déposée durant la dernière glaciation nous est apparue beaucoup plus complexe et nécessitera une étude particulière (chapitre 5).

De toute façon, avant de comprendre le passé lointain, il faut déjà avoir bien compris ce qui se passe actuellement. A partir des résultats obtenus sur la neige, nous tenterons de déduire des informations concernant la chimie de l'aérosol atmosphérique lui-même. On est bien conscient de la difficulté liée à la relation "air-neige" apparaissant ici; nous aborderons ce problème pour chaque élément ou composé.

Notre étude s'appuyera essentiellement sur les séries d'échantillons suivantes (dont le conditionnement est décrit en détail au chapitre 2) :

- Profils couvrant la période 1959-1969 à D 55, D 80, Dôme C et Pôle Sud,
- Neige déposée durant les 10000 dernières années à Byrd, D 10, Dôme C et Vostok,
- Neige couvrant les deux cents dernières années au Dôme C.

2 - VARIATIONS DES TENEURS DE LA NEIGE EN IMPURETES PROVENANT DE L'AEROSOL PRIMAIRE EMIS PAR LES OCEANS (EMBRUNS MARINS)

2.1. CHOIX D'UN INDICATEUR DES EMBRUNS MARINS

En géochimie polaire (Antarctique ou Groënland), les deux éléments les plus couramment utilisés comme indicateurs des embruns marins sont, soit le chlore, soit le sodium (Boutron 1978, Herron 1982,...). Cependant, l'étude de la chimie de la neige antarctique a montré (chapitre 3) que le rapport Cl/Na pouvait, en particulier dans les sites centraux comme le Dôme C, devenir très différent du rapport de l'eau de mer. Il est donc nécessaire d'examiner lequel de ces deux éléments représente l'indicateur le mieux approprié pour servir de référence.

En régions côtières, le problème ne se pose pas comme en témoignent nos résultats de Na^+ , Cl^- , K^+ , Ca^{++} et Mg^{++} obtenus, d'une part sur des échantillons de surface prélevés sur les quarante premiers kilomètres de l'axe Dumont d'Urville-Dôme C, d'autre part sur des carottes prises dans les cent premiers mètres du forage 300 m effectué à D 10 (seule la partie haute de ce forage est représentative de la précipitation locale, voir paragraphe 4.4. chapitre 2).

Pour ces deux séries d'échantillons côtiers, (tableau 13) nous observons des rapports K/Na , Mg/Na , Ca/Na et Cl/Na très voisins des valeurs de l'eau de mer (voir tableau 7, chapitre 3).

	K/Na	Mg/Na	Ca/Na	Cl/Na
D 10 (0 à 100 m)	$0,033 \pm 0,006$	$0,121 \pm 0,001$	$0,039 \pm 0,001$	$1,87 \pm 0,17$
Balises D 10 D 24 (surface) D 40	$0,029 \pm 0,005$	$0,118 \pm 0,001$	$0,037 \pm 0,001$	$1,75 \pm 0,06$
Eau de mer	0,037	0,12	0,038	1,8

Tableau 13 : Valeurs observées pour les rapports entre Na, Cl, K, Mg, Ca dans la neige des régions côtières de Terre Adélie.

Sur la neige déposée au Dôme C, entre 1914 et 1974 environ, Boutron et Lorius, 1979, montrent que le facteur d'enrichissement par rapport à l'eau de mer du magnésium défini par :

$$f_e = \frac{(\text{Mg/Na})_{\text{neige}}}{(\text{Mg/Na})_{\text{eau de mer}}} \quad (25)$$

est proche de l'unité et non corrélé avec le temps.

Sur cette même période de temps, au Dôme C, nos mesures de chlore et de sodium font apparaître un rapport Cl/Na très élevé ($\text{Cl/Na} = 4,1$) durant la période 1959-1969 (1,25 à 2,00 m de profondeur), rapport qui devient au contraire très faible ($\text{Cl/Na} = 1,1$) au cours des années 1900 à 1920 (5,20 à 6,50 m de profondeur) (voir plus loin, figure 47).

Par ailleurs, sur des échelles de temps plus grandes, notre étude de la carotte du Dôme C a également mis en évidence des rapports Cl/Na tantôt très supérieurs, tantôt très inférieurs à la valeur de l'eau de mer; les rapports $\frac{\text{K}}{\text{Na}}$ et $\frac{\text{Mg}}{\text{Na}}$ restant simultanément inchangés et proches du rapport de l'eau de mer (tableau 14).

Profondeur (m de glace)	K/Na	Mg/Na	Cl/Na
238 - 360 m 7 000-10 000 BP	$0,038 \pm 0,01$	N.D.	$3,21 \pm 0,83$
360 - 454 m 10 000-15 000 BP	$0,032 \pm 0,007$	$0,119 \pm 0,018$	$0,51 \pm 0,19$

Tableau 14 : Rapports $\frac{\text{K}}{\text{Na}}$, $\frac{\text{Mg}}{\text{Na}}$ et $\frac{\text{Cl}}{\text{Na}}$ obtenus sur la carotte du Dôme C pour deux périodes de temps différentes.

L'ensemble de ces résultats suggère que le sodium est un bien meilleur indicateur que le chlore de la teneur de la neige antarctique en impuretés provenant des embruns marins. Rappelons toutefois que, comme nous l'avons clairement établi au paragraphe 5.2., chapitre 3, la chromatographie ionique mesure en fait le sodium total (à savoir le sodium marin qui est soluble et le sodium terrigène insoluble lors de la fusion, mais qui se solubilise ultérieurement sur les colonnes chromatographiques).

Nous n'aurons cependant à considérer ici que le cas d'échantillons pour lesquels la contribution en sodium terrigène reste faible devant la contribution marine, comme l'indiquent les teneurs en aluminium obtenues dans les études antérieures (tableau 15).

	Al (ng.g^{-1})	Références	Na _T (calculé) en ng.g^{-1}
Axe Dumont d'Urville- Dôme C (D10 - D80)	$1,08 \pm 1,20$	Boutron 1981	$0,30 \pm 0,38$
Dôme C (1959-1969)	$0,97 \pm 0,24$	Boutron et Lorius 1979	$0,27 \pm 0,07$
Dôme C (1914-1974)	$1,60 \pm 0,86$	Boutron et Lorius 1979	$0,45 \pm 0,24$
D 80 (1962-1969)	$1,04 \pm 0,55$	Boutron 1981	$0,29 \pm 0,15$
Période holocène au Dôme C (0 - 381 m)	$2,27 \pm 2,3$	Petit et al.1981	$0,76 \pm 0,64$
Période holocène à Vostok	$2,4 \pm 1,3$	De Angelis et al. 1984	$0,67 \pm 0,36$
Période holocène à Byrd	$1,5 \pm 0,3$	Cragin et al.1977 Ragone et Finelli 1972	$0,15 \pm 0,08$
Période holocène à D 10	$0,91 \pm 0,67$	De Angelis et Legrand (en préparation)	$0,25 \pm 0,19$

Tableau 15 : Teneur en aluminium obtenue par différents auteurs pour des couches de neige similaires (site et période de temps) à celles que nous étudions et évaluation de la concentration de sodium terrigène en résultant.

En effet, la teneur de nos échantillons en aluminium atteint au maximum 5 ng.g^{-1} (holocène Dôme C, voir tableau 15) soit $1,4 \text{ ng.g}^{-1}$ de sodium terrigène en considérant la composition moyenne des roches crustales proposée par Taylor (1964).

Dans toute cette partie concernant les variations spatiotemporelles de la teneur en impuretés issues du sel de mer, nous utiliserons donc le sodium comme référence. Sur les échantillons correspondants, nous avons calculé les rapports Cl/Na mais l'ensemble des résultats concernant ce rapport fera l'objet d'une synthèse à la fin de ce paragraphe.

2.2. VARIATIONS GEOGRAPHIQUES

2.2.1. Variations sur les quatre cents premiers kilomètres de l'axe Dumont d'Urville-Dôme C

Les teneurs en sodium et en chlore obtenues sur une série d'échantillons de surface prélevés (entre 0 et 40 cm de profondeur, par rapport à la surface janvier 1983) entre Dumont d'Urville et la balise D 80 (située à 430 km de la côte) sont présentées figure 36. Les teneurs en sodium et en chlore de la neige décroissent rapidement dans les quarante premiers kilomètres (soit jusqu'à 1000 m d'altitude environ), se stabilisent ensuite au-delà des cent kilomètres (soit 1600 m d'altitude). La variabilité des teneurs en sodium que l'on peut observer ($4,6 < \text{Na}^+ < 22 \text{ ng.g}^{-1}$) entre 100 et 430 km est à relier essentiellement à la représentativité temporelle des échantillons, différente d'une balise à l'autre.

Comme nous allons le voir plus loin, la connaissance des flux de retombées dans la neige et l'étude de sa relation avec le taux d'accumulation est nécessaire pour aborder le problème du transfert air-neige. Le flux de retombée annuelle moyenné sur une période de temps donné, peut être calculé en chaque site par la relation :

$$\Phi \quad (\text{kg}/\text{km}^2/\text{an}) = c \times a \quad (26)$$

où c désigne la concentration moyenne de l'impureté considérée dans la couche de neige déposée pendant la période échantillonnée, et a , la masse de neige tombée par unité de surface, en ce site, en une année. C'est bien sûr un calcul

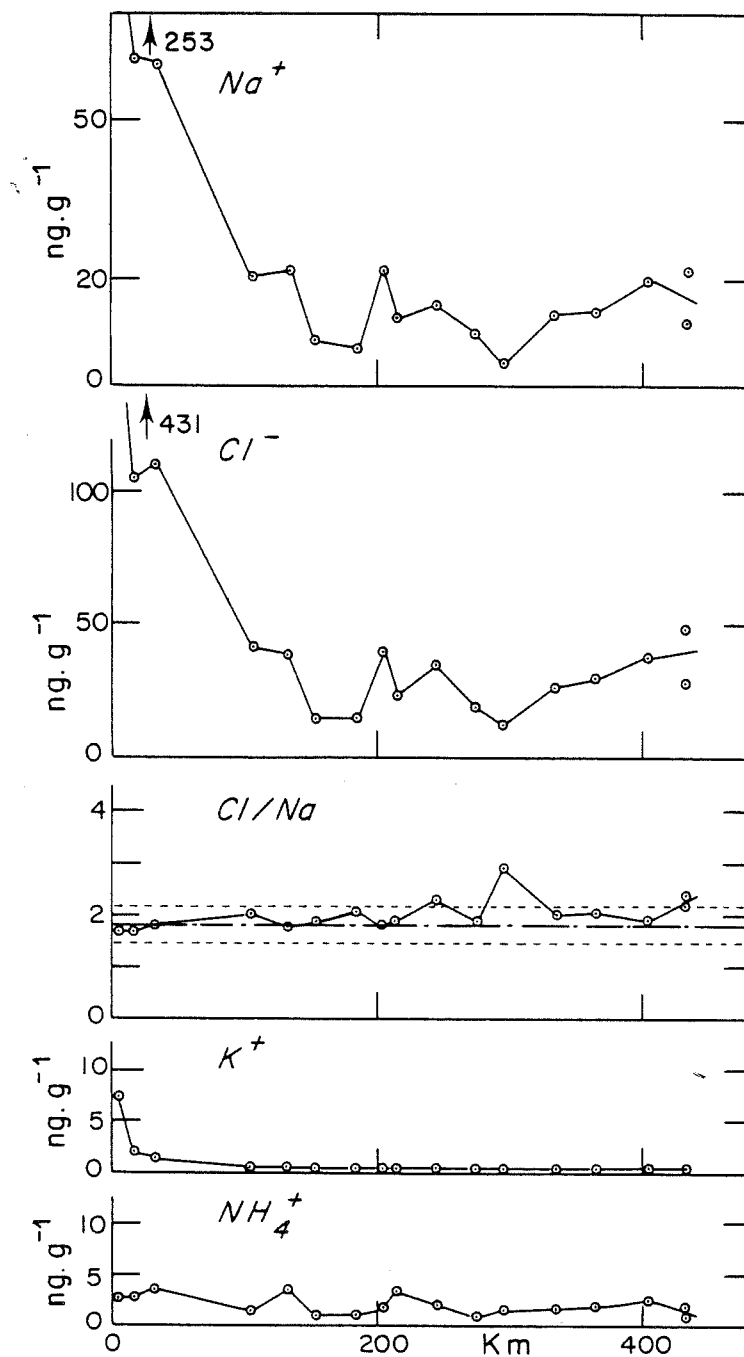


Figure 36 : Variations des concentrations en Na⁺, Cl⁻, K⁺ et NH₄⁺ et du rapport Cl/Na sur les quatre cents premiers kilomètres de l'axe Dumont d'Urville - Dôme C.

Station	Distance à la côte (km)	Altitude (m)	Φ_{Na^+}	Φ_{Cl^-}	$\Phi_{\text{NO}_3^-}$	$\Phi_{\text{SO}_4^{2-}}^{\star}$ ex.	$\frac{a}{\text{H}_2\text{O}}/\text{an}$
D 10	4	272	31,3	56,0	2,6	2,6	13
D 24	17	602	22,3	37,8	14,4	19,7	36
D 40	33	848	38,4	69,3	5,7	9,4	63
D 47	100	1564	5,4	10,7	15,1	6,2	26
D 50	130	1746	5,3	9,3	10,1	4,5	24
D 52	150	1868	2,1	3,9	5,0	2,2	25
D 55	180	2028	0,6	1,2	2,1	1,3	8
D 57	200	2105	8,8	15,8	16,4	7,9	40
D 58	210	2186	3,8	7,1	9,0	4,0	29
D 61	240	2336	5,0	11,7	28,4	13,3	33
D 64	270	2370	2,1	4,0	5,5	2,6	21
D 66	290	2394	0,9	2,7	13,4	4,9	20
D 70	330	2432	2,0	4,0	8,6	3,0	15
D 73	360	2445	1,6	3,2	8,3	4,0	11
D 77	400	2444	4,4	8,4	9,9	3,8	22
D 80	430	2524	4,1	9,4	16,8	5,9	24

Tableau 16 : Evaluation des flux de retombées moyens de sodium et de chlore dans la neige de surface collectée sur les 400 premiers kilomètres de l'axe Dumont d'Urville-Dôme C. Les flux sont exprimés en $\text{kg}/\text{km}^2/\text{an}$.

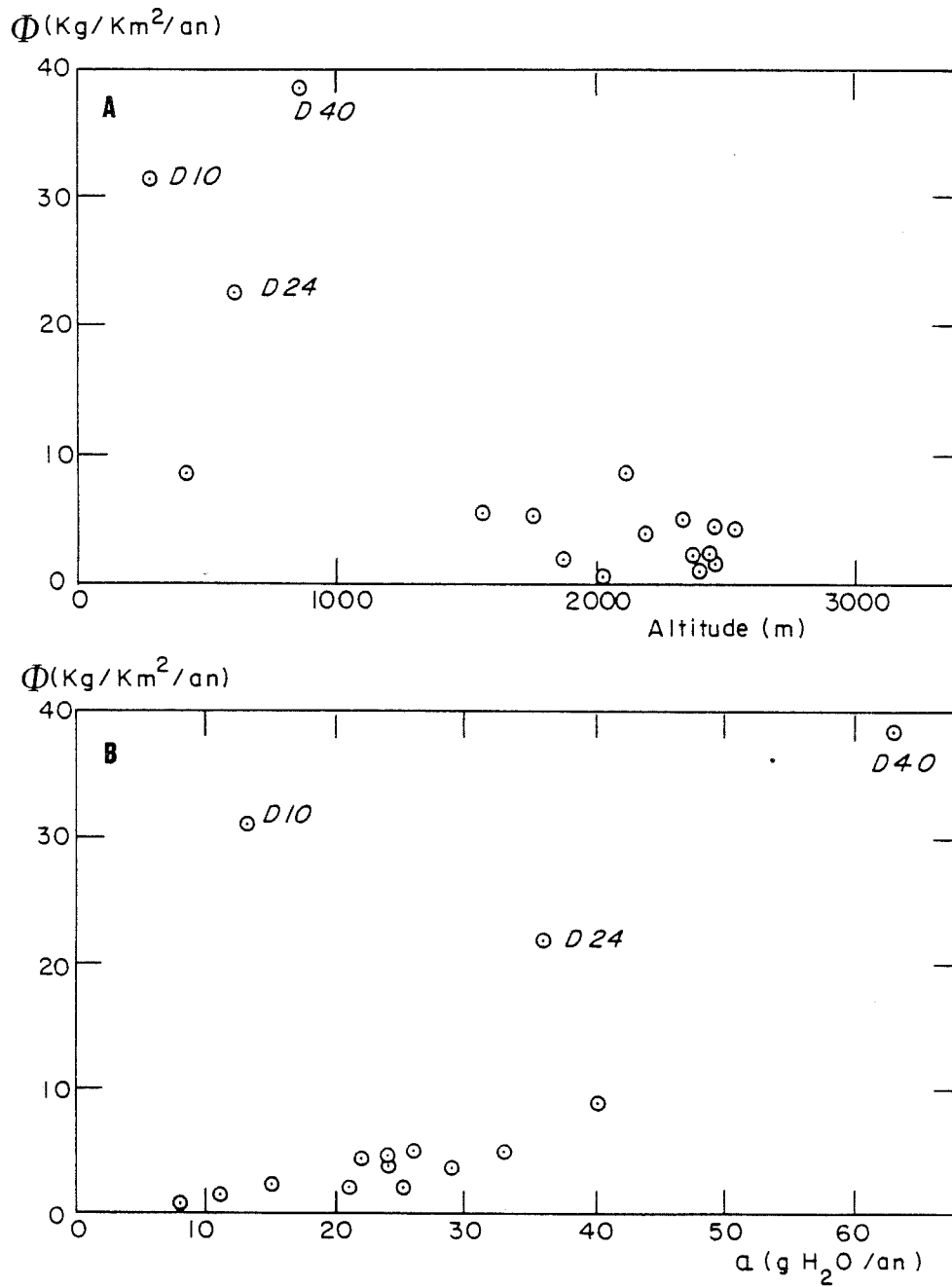


Figure 37 : Variations du flux de retombées annuel de sodium en Terre Adélie en fonction de l'altitude (A), du taux d'accumulation (B).

très approximatif dont l'application à nos échantillons, prélevés en surface entre D 10 et D 80, est particulièrement difficile du fait d'une part que le prélèvement de 40 cm de neige n'intègre pas la même période de temps en chaque site, d'autre part que le taux d'accumulation annuel peut varier d'une année sur l'autre. Les valeurs de flux annuels données dans le tableau 16 ne doivent donc être considérées que comme des valeurs indicatives. La figure 37 A montre néanmoins que les flux de retombées annuels de sodium varient en fonction de l'altitude. Malgré une forte dispersion des points obtenus, nos résultats font apparaître de manière très schématique une première zone située entre la mer et une altitude de 1500 m environ où les flux de retombées de sodium sont très importants. Au-delà de cette altitude, les flux sont plus faibles et semblent ne plus évoluer de manière significative avec l'altitude ($r = -0,3$ pour 13 points). Si l'on exclut la zone située en-dessous de 1500 m d'altitude (D 10, D 24 et D 40), les flux de retombées de sodium sont corrélés de manière significative avec le taux d'accumulation (figure 37 B) ($r = 0,84$ pour 13 points). Au-delà de la zone soumise à une forte influence de la source marine (0 à 1500 m d'altitude, soit au maximum les deux cents premiers kilomètres), nous pouvons déduire de cette étude grossière que les variations du flux de retombées dépendent essentiellement du taux d'accumulation. Ce résultat est en accord avec une précédente étude portant sur la même région de l'Antarctique (Boutron, 1979).

2.2.2. Etude de la neige à D 55, D 80, Dôme C et Pôle Sud (période 1959-1969)

L'étude précédente a permis de dégager les grandes tendances des variations de concentration et de flux de retombées de sodium en fonction de l'altitude et du taux d'accumulation. Cette étude n'était cependant pas suffisamment précise pour appréhender les mécanismes de retombée de cet aérosol primaire dans la neige antarctique. Pour établir une relation entre le flux de retombées et le taux d'accumulation en un site donné, nous disposons de quatre profils couvrant la période 1959-1969 à D 55 (figure 38), D 80 (figure 39), Dôme C (figure 40) et au pôle Sud (figure 41).

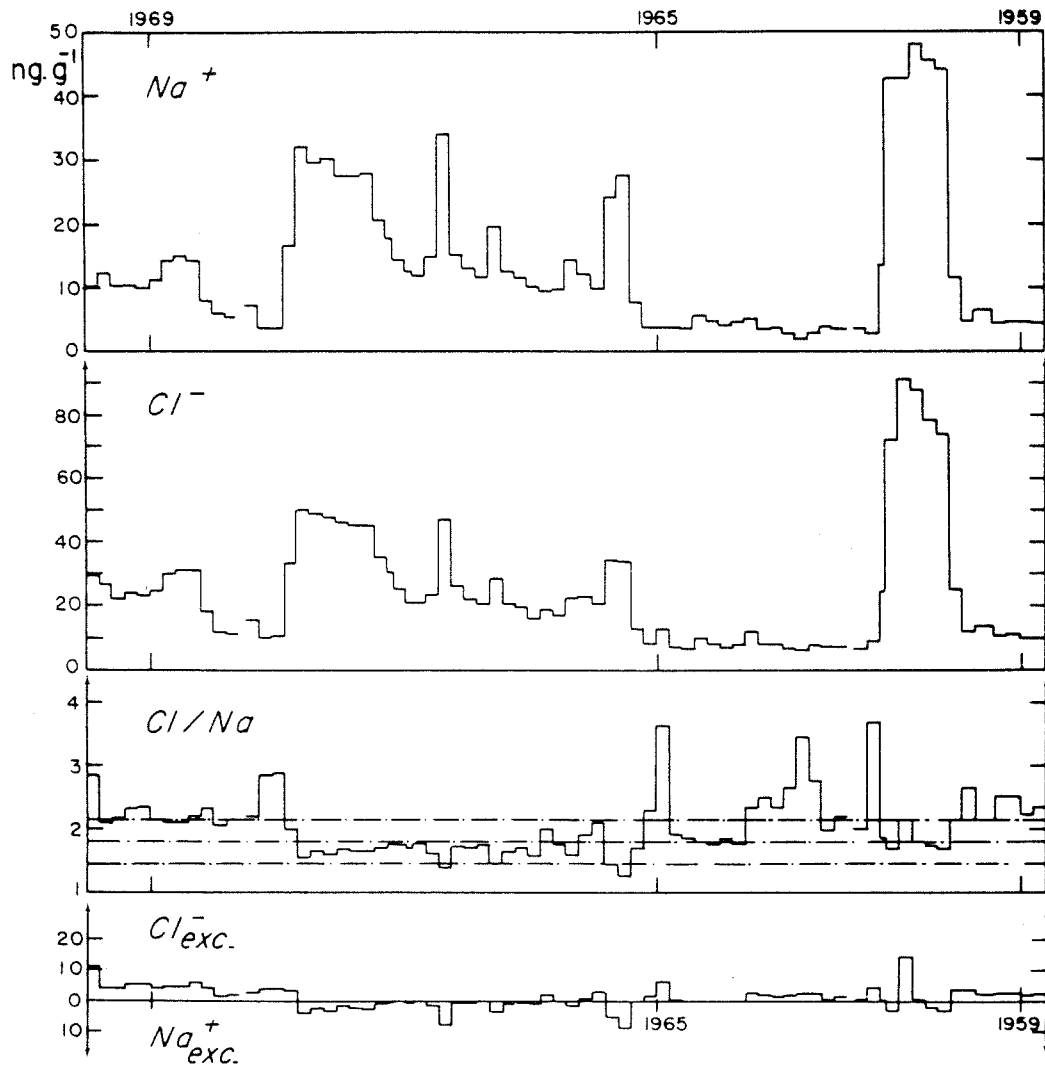


Figure 38 : Evolution de Na^+ , Cl^- , Cl/Na et Cl_{ex}^- (respectivement Na_{ex}^+) dans la neige déposée entre 1959 et 1969 à D 55.

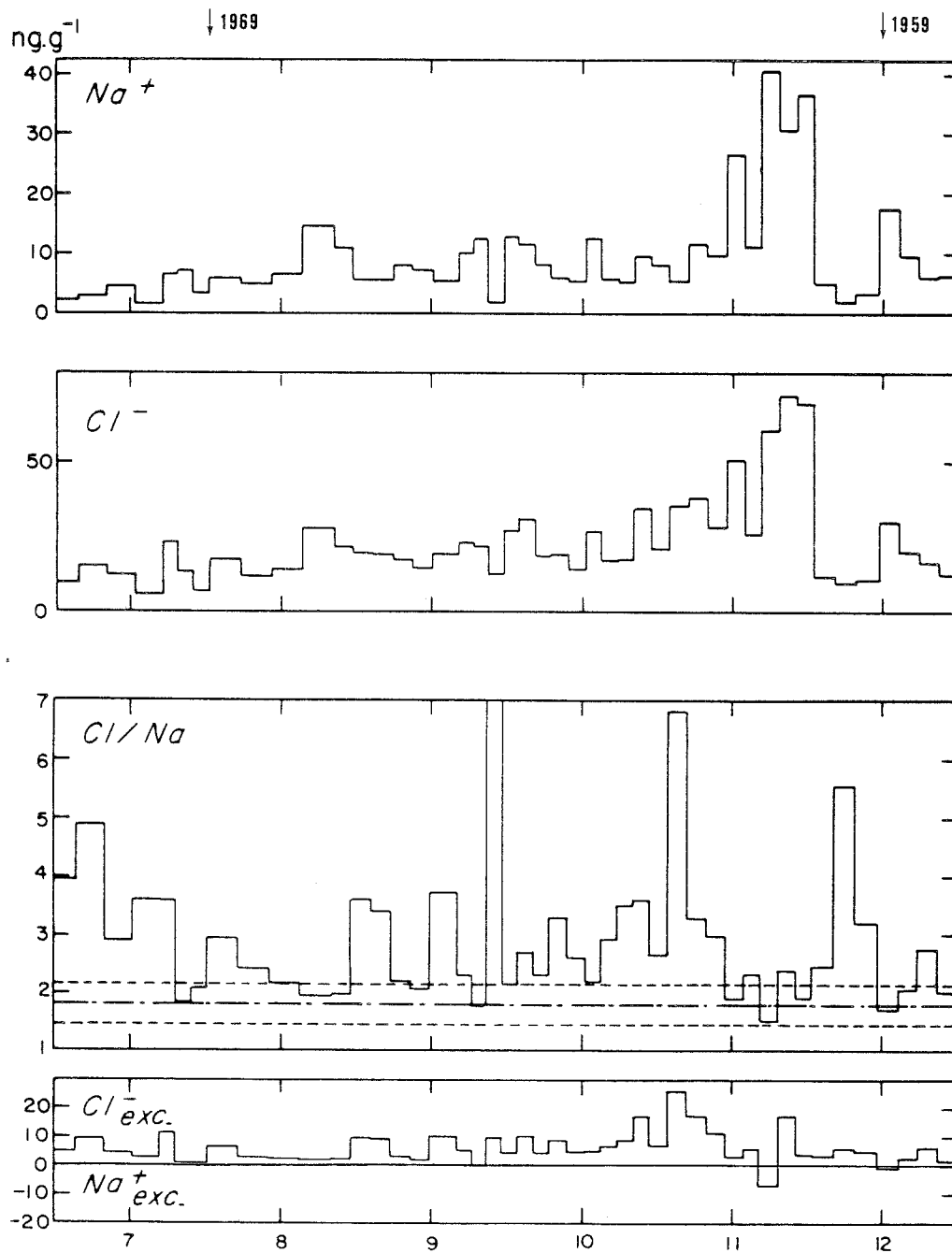


Figure 39 : Evolution de Na^+ , Cl^- , Cl/Na et Cl^-_{ex} (respectivement Na^+_{ex}) dans la neige déposée entre 1959 et 1969 à D 80.

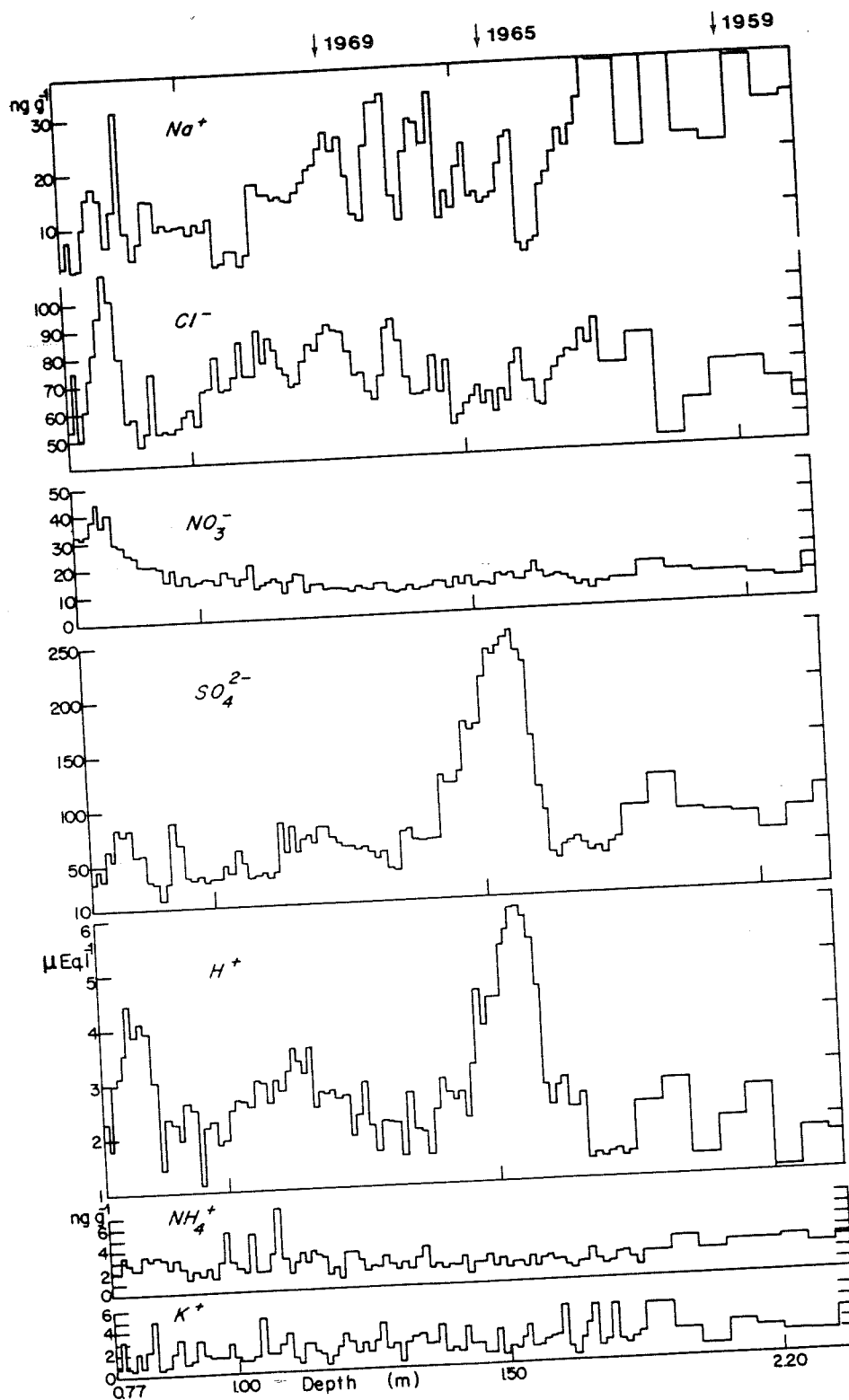


Figure 40 : Variations des teneurs en ions majeurs entre 0,77 et 2,40 mètres de profondeur au Dôme C.

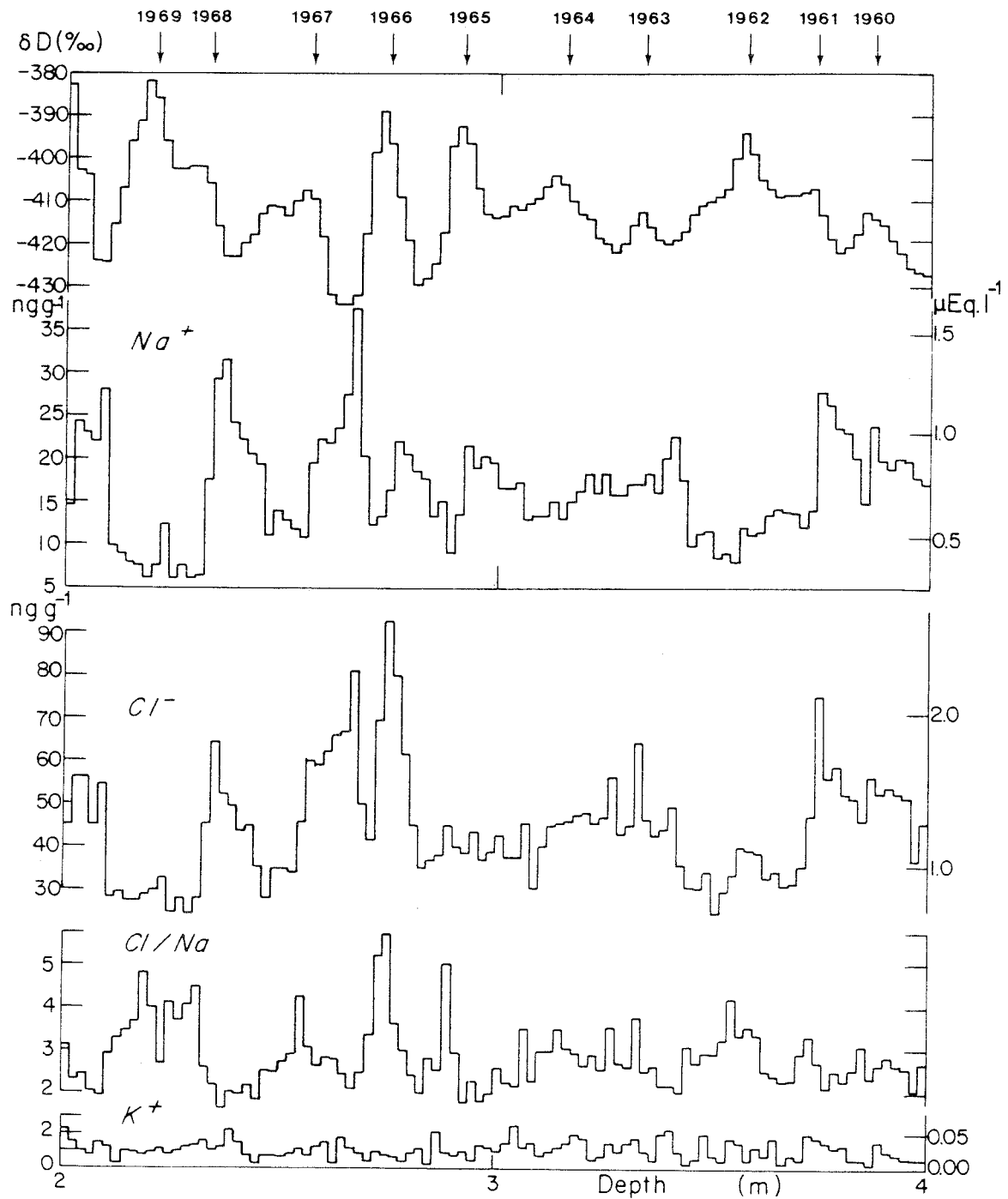


Figure 41 : Evolution de Na^+ , Cl^- , Cl/Na et K^+ dans la neige déposée entre 1959 et 1969 au Pôle Sud, la courbe du haut (teneur en deutérium δD est de Jouzel et al. 1983).

Stations	D 55	D 80	Pôle Sud	Dôme C
Altitude (m)	2028	2524	2850	3240
Distance à la côte(km)	180	430	1274	1070
Na^+ (ng.g ⁻¹)	13,8 ± 12,0	10,1 ± 9,0	14,7 ± 5,8	22,1 ± 9,0
Cl^- (ng.g ⁻¹)	24,8 ± 18,8	24,8 ± 15,6	45,1 ± 13,1	68,5 ± 11,4
$\text{Cl}^-_{\text{ex.}}$ (ng.g ⁻¹)	0,0 ± 5,0	6,2 ± 6,6	17,6 ± 9,5	25,7 ± 18,1
Cl/Na (ng.g ⁻¹)	2,02 ± 0,49	2,93 ± 1,31	2,85 ± 0,76	3,87 ± 3,55
a (g H ₂ O/an)	7,0	23,7	8,5	3,4
Φ_{Na^+} (kg/km ² /an)	0,97	2,4	1,25	0,75
Φ_{Cl^-} (kg/km ² /an)	1,74	5,9	3,83	2,33

Tableau 17: Caractérisation de la neige déposée entre 1959 et 1969, en quatre sites géographiquement différents en Antarctique de l'Est.

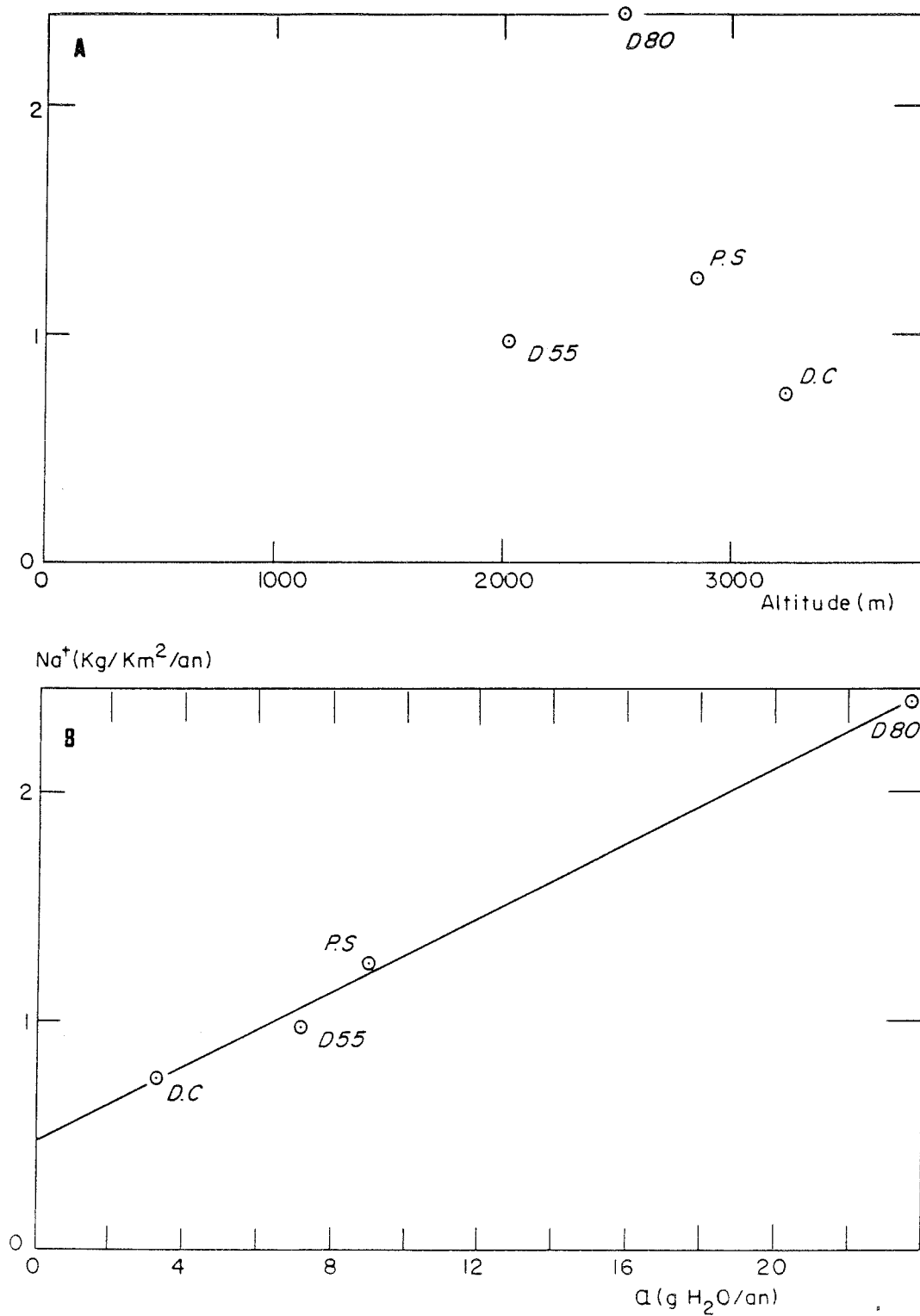


Figure 42 : Variations du flux de retombées annuel moyen de sodium en 1959 et 1969 pour différents sites de l'Antarctique de l'Est, en fonction de l'altitude (A), du taux d'accumulation (B).

Le calcul des flux de retombées moyens sur ces dix ans est présenté pour chaque site dans le tableau 17. Soulignons que cette période est particulièrement bien adaptée à ce calcul car les taux d'accumulation sont exceptionnellement bien connus entre les deux horizons repères radioactifs 1955 et 1965 enregistrés dans la neige.

Le flux moyen de sodium ne présente pas de variations systématiques avec l'altitude (figure 42), mais paraît être essentiellement modulé par la valeur du taux d'accumulation ($\Phi = 0,473 + 0,082 a$ avec $r = 0,996$). L'ordonnée à l'origine non nulle de la droite de régression obtenue (figure 42) montre qu'il se produit des retombées de sodium au sol, même en l'absence de précipitation. Cette quantité, appelée dépôt sec, représente 49% des retombées à D 55, 20% à D 80, 38% au Pôle Sud et 63% au Dôme C. Ce phénomène de dépôt sec rend compte de la teneur relativement importante en sodium de la neige du Dôme C (voir tableau 17). L'existence d'une relation linéaire entre le flux de retombées et l'accumulation suggère que la teneur de l'atmosphère en aérosols marins (embruns) est assez homogène et ne varie guère lorsque l'on passe d'un site à 2000 m d'altitude en Terre Adélie à un site à 3200 m d'altitude en Antarctique de l'Est.

2.2.3. Comparaison de la période holocène à D 10, Byrd, Dôme C et Vostok

L'étude des flux de retombées de sodium a été effectuée précédemment pour les seuls sites de l'Antarctique de l'Est. Il nous est apparu intéressant d'étendre notre étude à l'Antarctique de l'Ouest. Pour ce faire, et ne disposant pas de prélèvements en surface dans cette région, nous avons, à partir de nos résultats sur les forages profonds (D 10, Dôme C, Vostok et Byrd) effectué une étude similaire à la précédente, en prenant les teneurs moyennes observées durant toute la période holocène (qui correspond au climat actuel des 10 000 dernières années).

Sites	Altitude (m)	Distance à la côte (km)	Na ⁺ (ng.g ⁻¹)	a (g H ₂ O/an) (Références)	Φ (kg/km ² /an)
Dôme C	3240	1070	16	3,4 (Lorius et al.1979)	0,6
Vostok	3490	1294	24	2,2 (Barkov et al.1977)	0,5
D 10	?	?	11,0	20-30 (voir texte)	2,2 - 3,3
Byrd	1524	670	25	13 (Raynaud et Whillans) 1982)	3,25

Tableau 18 : Evaluation du flux de retombées moyen en sodium pour la période holocène.

Pour le forage de D 10, le calcul ne peut être qu'approximatif car le taux d'accumulation est mal connu en liaison avec le problème de l'origine de la glace en ce site côtier (voir chapitre 2). Cependant, on peut penser que la glace datant du début de l'holocène viendrait d'environ 250 km de la côte (Young et al. 1984). Au vu des accumulations observées en surface le long de l'axe D 10 - Dôme C (Lambert et al. 1977; Pourchet et al. 1983) il paraît raisonnable de considérer une accumulation moyenne de 20 à 30 grammes d'eau par an. Toujours pour s'affranchir le mieux possible du problème d'origine de la glace, nous n'avons pris en compte que les échantillons correspondant au tout début de la période holocène (c'est-à-dire entre 195 et 210 m de profondeur, voir figure 90, chapitre 5). Les flux de retombées ainsi évalués (tableau 18) sont tout à fait cohérents pour les trois sites de l'Antarctique de l'Est (Dôme C, Vostok et D 10) avec la relation précédente (voir figure 43). Par contre, le point correspondant à la station Byrd (Antarctique de l'Ouest) se situe nettement au-dessus de la droite matérialisant la relation flux-accumulation obtenue pour la période 1959-1969.

Nos résultats confirment que la station Byrd située à 1500 m d'altitude et à 670 km de la côte en Antarctique de l'Ouest (voir figure 17, chapitre 2) est vraisemblablement soumise à un régime océanique un peu plus marqué que l'Antarctique de l'Est en général. En considérant cette station comme bien représentative de la circulation générale en Antarctique de l'Ouest, la figure 43 permet de proposer une retombée deux fois plus importante d'aérosols marins en Antarctique de l'Ouest qu'en Antarctique de l'Est. Ce facteur deux est en bon accord avec celui avancé par d'autres auteurs (Herron et Langway, 1979, Herron 1982).

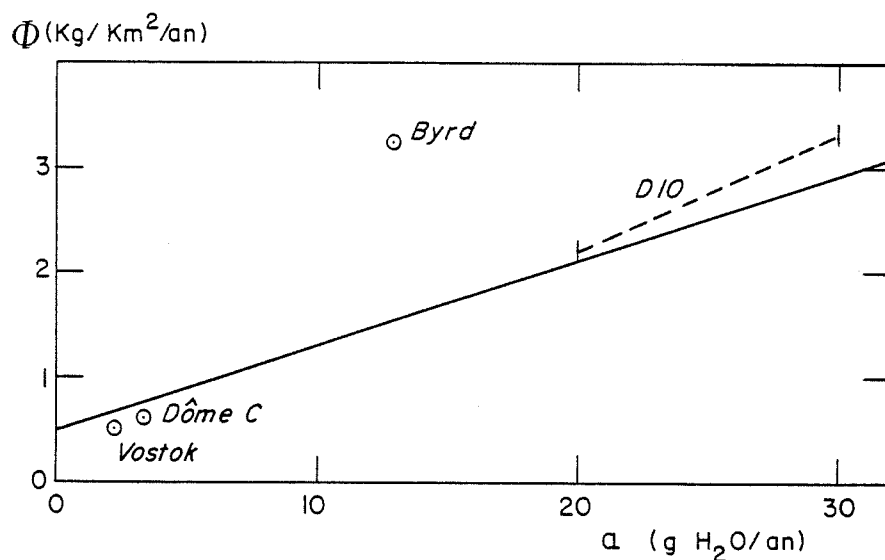


Figure 43: Variations du flux de retombées annuel moyen de sodium sur la période holocène (0 à 10 000 B.P.) pour les trois sites de l'Antarctique de l'Est (Terre Adélie, Dôme C, Vostok) et un site de l'Antarctique de l'Ouest (Byrd) en fonction du taux d'accumulation. La droite représente la relation "flux-accumulation" obtenue sur la période 1959-1969.

Cette étude des flux de retombées de sodium montre que les sites de la Terre Adélie (situés au-dessus de 2000 m d'altitude) sont très comparables en termes de retombées d'aérosols marins avec les autres sites du plateau antarctique (Pôle Sud, Dôme C et Vostok). Cette conclusion sera très utile pour interpréter les variations de concentration observées dans la glace des carottages profonds, en terme de modification de l'environnement atmosphérique passé.

2.3. VARIATIONS SAISONNIERES ENREGISTREES DANS LA NEIGE

Les éventuelles variations de la concentration en impuretés en fonction du cycle saisonnier peuvent parfois être une aide pour identifier leurs sources. Cette recherche peut également être très utile pour dater les couches de neige, d'autant plus que les éléments chimiques tels le sodium, ne diffusent pas dans la neige contrairement au deutérium de la molécule d'eau. Le Pôle Sud constitue le site adéquat sur le plateau antarctique pour mener à bien ce type d'étude (voir Jouzel et al., 1983).

Nous avons étudié, d'une part la période 1959-1969, d'autre part la période 1949-1953, période durant laquelle les variations de la teneur en deutérium de la neige obtenues par Jouzel et al. 1983 apparaissent particulièrement bien marquées. Le pas d'échantillonnage constant et égal à deux centimètres, correspondant en moyenne à dix échantillons par an, ne représente pas toujours exactement la même fraction d'année, puisque l'épaisseur de la couche annuelle peut varier d'une année à l'autre. Afin de travailler avec un découpage homogène pour chaque année, nous avons redécoupé le signal brut des concentrations (voir figure 41 pour la période 1959-1969 et figure 44 pour la période 1949-1953) en dix parties égales (ou décile) pour chaque couche annuelle (comme le suggère Petit, 1982). Le signal isotopique est pris comme base de temps. Deux exemples de redécoupage sont présentés en annexe (tableau A2.5 pour l'année 1950 couverte par sept échantillons, tableau A2.6 pour l'année 1962 couverte par douze échantillons). Nous avons ensuite calculé la moyenne pour chaque décile. Les signaux saisonniers moyens alors obtenus pour les différents composés étudiés sont présentés figure 45 pour les deux périodes 1959-1969 et 1949-1953. Dans chaque cas, nous avons également reporté le signal isotopique moyen calculé de la même manière, à partir des profils publiés par Jouzel et al. 1983.

La concentration en sodium d'abord faible en janvier augmente durant les mois d'hiver en passant par un maximum vers le mois de septembre (voir figure 45). Le signal isotopique moyen (présence d'un maximum en été) suggère que la répartition des précipitations au cours de l'année n'est pas en général déséquilibrée en faveur de l'une ou l'autre saison. L'existence d'un

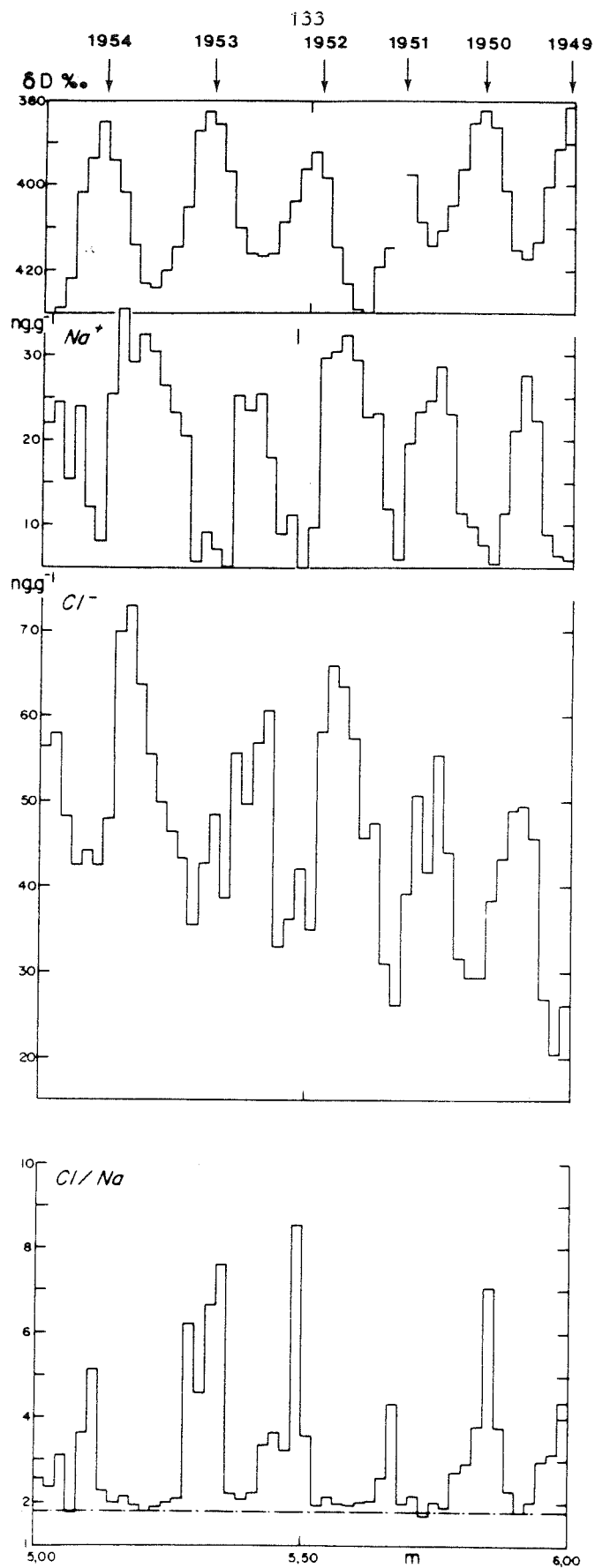


Figure 44 : Variations de Na^+ , Cl^- et Cl/Na pour la neige déposée au Pôle Sud entre 1949 et 1953, la courbe du haut (teneur en deutérium) est de Jouzel et al. 1983.

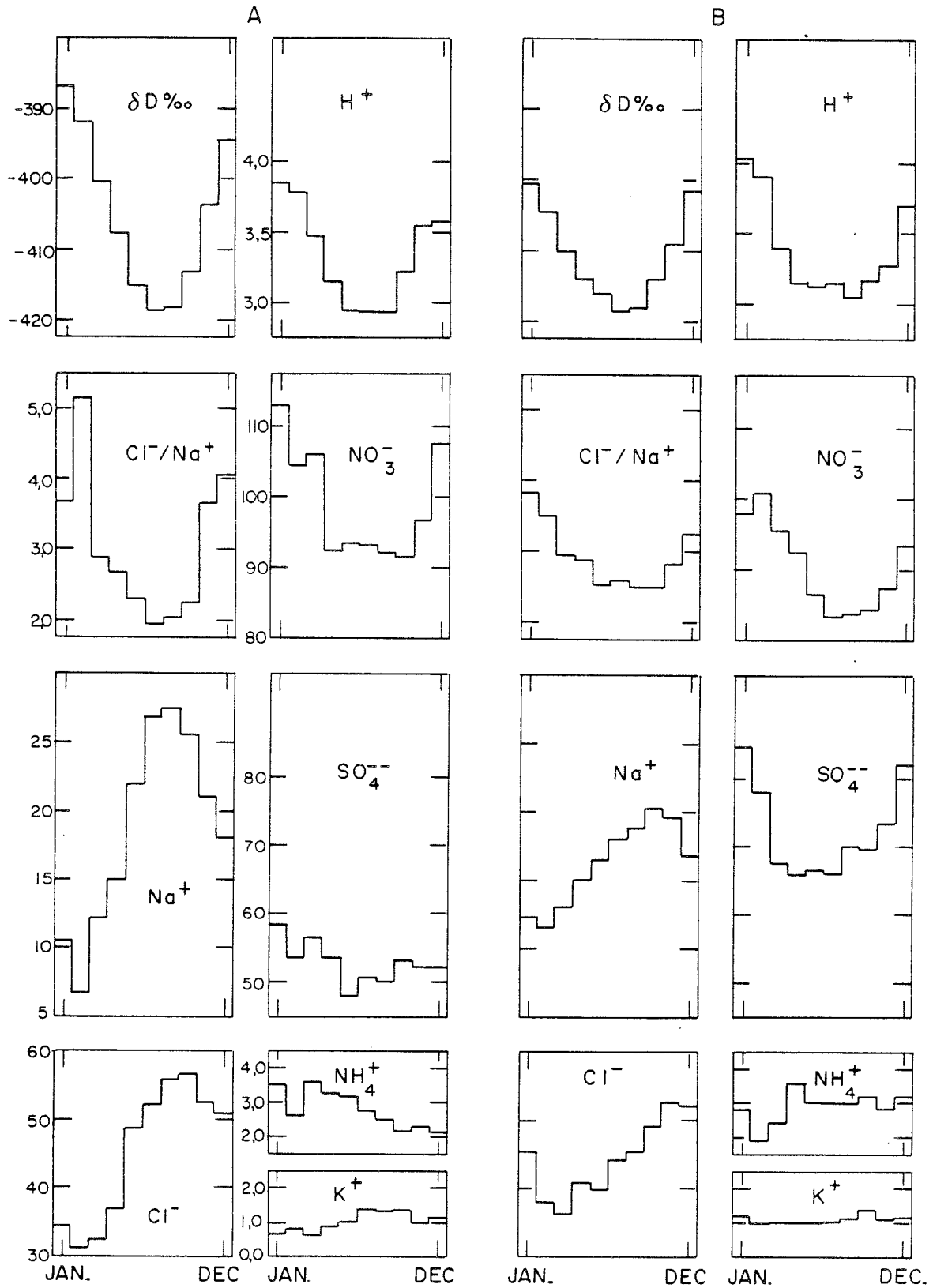


Figure 45 : Signaux saisonniers moyens obtenus pour les différents ions étudiés (Na^+ , Cl^- , NH_4^+ , K^+ , H^+ , NO_3^- et SO_4^{--}), le rapport Cl/Na et la teneur en deutérium ($\delta D\text{‰}$) au Pôle Sud : (A) période 1949-1953, (B) période 1959-1969.

dépôt sec de sodium que nous avons estimé à 40% en ce site, conjugué éventuellement à une forte baisse du taux de précipitations durant l'hiver pourrait rendre compte de l'augmentation de la teneur en sodium de ces couches d'hiver. Cependant, une telle éventualité doit être rejetée car dans ce cas, les valeurs minimales de la teneur en deutérium qui marquent les hivers, ne seraient plus enregistrées correctement. Nous pouvons donc, en première approximation, interpréter les variations de concentration en impuretés de la neige comme des variations de la charge en aérosols de l'atmosphère. Durant l'hiver, les basses couches de l'atmosphère antarctique se trouvent isolées de la moyenne et haute atmosphère (> 5 km c'est-à-dire la haute troposphère et la stratosphère) par une couche d'inversion très marquée. A la fin de l'hiver, tandis que la glace de mer est à son extension maximum, débute une période de violentes tempêtes en mer (tempêtes d'équinoxe) qui a pour effet d'augmenter fortement la charge en aérosols marins au-dessus de l'océan.

La composition chimique de l'aérosol atmosphérique au-dessus de la station Pôle Sud a fait l'objet de nombreuses études, souvent fragmentaires, (Shaw 1980, Maenhaut et al. 1979, Shaw 1983, Cunningham et Zoller 1981, Parungo et al. 1979, Hogan et al. 1982). Cunningham et Zoller (1981) observent de manière systématique une charge maximale en aérosols marins dans l'atmosphère durant l'hiver. Si l'on considère une redistribution toujours possible des couches de neige au sol d'une part, le caractère très ponctuel des mesures dans l'air d'autre part, les rapports hiver-été des concentrations dans la neige sont très cohérents avec ceux obtenus dans l'aérosol atmosphérique (voir tableau 19).

	Eté	Hiver	Rapport $\frac{\text{hiver}}{\text{été}}$
Aérosol	5,1 ng/m ³	40 ng/m ³	8,1
Neige	1949-1953 6,7 ng/g	27,5 ng/g	4,1
	1959-1969 11,6 ng/g	20,2 ng/g	1,8

Tableau 19 : Comparaison des rapports de concentration de sodium entre été et hiver dans l'aérosol (Cunningham et Zoller, 1981) et dans la neige (ce travail), pour le Pôle Sud.

L'augmentation de la teneur en sodium de la neige et de la charge en aérosols marins de l'atmosphère à la fin de l'hiver coïncident bien avec la pénétration maximale des dépressions sur le continent antarctique (Van Loon, 1966). Dans les autres sites étudiés (D 55, D 80 et Dôme C, voir figures 38, 39 et 40), les variations saisonnières de la teneur en sodium de la neige n'apparaissent pas clairement. Toutefois, notons qu'au Dôme C nous observons cinq pics bien définis entre 1,20 et 1,65 m de profondeur; l'interprétation de ces cinq pics en termes de variations saisonnières semble cohérente avec la valeur du taux d'accumulation déterminée indépendamment à partir des deux horizons repères radioactifs (1955 et 1965). En dehors de cette couche de neige, les variations saisonnières sont plus difficiles à déceler par suite de la redistribution des couches annuelles au sol sous l'effet du vent, comme c'est d'ailleurs le cas du deutérium (Jouzel et al. 1983). A la balise D 80, la quantité de neige déposée en une année est plus conséquente qu'à D 55, Dôme C et Pôle Sud; par contre, le vent catabatique est également plus important dans cette région de la Terre Adélie que sur le haut du plateau antarctique.

2.4. ETUDE ET INTERPRETATION DU RAPPORT $\text{Cl}/_{\text{Na}}$ DANS LA NEIGE ANTARCTIQUE

2.4.1. Variations spatiotemporelles du rapport $\text{Cl}/_{\text{Na}}$ dans la neige antarctique

Au vu des erreurs expérimentales commises sur la mesure du sodium et du chlore (voisines de 10%, voir paragraphe 3.4., chapitre 1), nous pourrions considérer que le rapport $\text{Cl}/_{\text{Na}}$ observé dans la neige ou la glace est identique au rapport de l'eau de mer (soit 1,8 voir tableau 7, chapitre 3) si celui-ci reste compris entre 1,44 et 2,16.

2.4.1.1. Variations en surface sur l'axe Dumont d'Urville-D 80 (430 km)

La figure 36 montre que le rapport $\text{Cl}/_{\text{Na}}$ observé, dans les couches de neige de surface (0-40 cm) prélevées en janvier 1983, reste très voisin de 1,8 dans les deux cents premiers kilomètres de l'axe ($\text{Cl}/_{\text{Na}} = 1,86 \pm 0,12$)

puis augmente un peu en fin de raid entre 210 et 430 km ($Cl/Na = 2,21 \pm 0,33$). Notons que ces résultats sont en désaccord avec une étude antérieure (Briat et al. 1974) effectuée sur les couches de neige entre Dumont d'Urville et la balise D 120 (830 km de la côte). Ces auteurs obtenaient en effet des rapports supérieurs à dix à la balise D 80, mais il est vrai que la période de temps couverte par les échantillons entre ces deux études n'était pas la même (1982-83 pour ce travail, 1970 à 1973 pour l'étude de Briat et al. 1974).

2.4.1.2. Différences observées sur la période 1959-1969 à D 55, D 80, Dôme C et Pôle Sud

Des différences significatives apparaissent entre D 55, D 80, Dôme C et Pôle Sud pour le rapport Cl/Na moyen observé dans la neige durant la période 1959-1969. Nos résultats font en effet apparaître des quantités de chlore présent en excès par rapport à l'eau de mer négligeables à D 55 (associées à un rapport Cl/Na voisin de 1,8) mais qui deviennent significatives à D 80 pour atteindre près de 40% du chlore total à Dôme C et au Pôle Sud (voir tableau 17).

Au cours de cette étude, nous avons en fait étudié à D 80 une période de temps plus large (1953-1975); ceci nous a permis de comparer plus précisément nos résultats avec ceux de Briat et al. 1974. La comparaison des résultats obtenus sur la couche correspondant aux années 1970 à 1973 (située entre 5,50 et 7,00 m de profondeur environ pour notre profil) montre clairement que le désaccord sur les valeurs du rapport Cl/Na s'explique par des teneurs en chlore beaucoup plus élevées dans le travail de 1974 que dans le nôtre (tableau 20), en liaison sans doute avec un problème de contamination des échantillons déjà discuté au paragraphe 4.2. du chapitre 1.

Concentration (en ng.g ⁻¹)	Cl ⁻	Na ⁺	Cl ⁻ /Na ⁺
Briat et al. 1974	107 ± 44	8 ± 4	13,6
ce travail	17 ± 7	7 ± 4	2,8 ± 1,0

Tableau 20 : Résultats de Na⁺ et Cl⁻ sur la période 1970-1973 à D 80, dans ce travail (Tableau A.2.12) et dans une étude antérieure.

Par ailleurs, notons que contrairement au cas du sodium (voir paragraphe 2.2.2., figure 42), les flux de retombées de chlore sont beaucoup moins bien corrélés au taux d'accumulation (figure 46). L'étude du flux de retombées de chlore présent en excès par rapport à l'eau de mer suggère d'autre part que cette fraction du chlore est surtout importante dans les régions centrales de l'Antarctique (Dôme C et Pôle Sud, voir figure 46).

2.4.1.3. Variations saisonnières au Pôle Sud

Les variations saisonnières observées dans les couches de neige entre 1959 et 1969 montrent que durant l'hiver le rapport Cl/Na est proche du rapport de l'eau de mer (figure 45). En même temps, la teneur en sodium de la neige est maximale. Au contraire, durant les mois d'été, tandis que la teneur en sodium devient plus faible, le rapport Cl/Na augmente alors fortement. Cette étude du rapport Cl/Na des couches de neige au Pôle Sud est en accord très satisfaisant avec les résultats de Buat-Ménard, 1970 (période 1950-1952) et ceux de Briat et al. 1974 (période 1962-1964) (voir tableau 21).

	Période 1950 - 1952		Période 1962 - 1964	
Sodium (ng.g^{-1})	21 (Buat -Ménard, 1970)	$16,2 \pm 9,08$ (ce travail)	$14,0 \pm 1,0$ (Briat et al. 1974)	$14,4 \pm 3,0$ (ce travail)
Chlore (ng.g^{-1})	52 (Buat -Ménard, 1970)	$45,2 \pm 12,0$ (ce travail)	$44,0 \pm 9,0$ (Briat et al. 1974)	$42,7 \pm 7,4$ (ce travail)
Cl/Na (ng.g^{-1})	2,5 (Buat -Ménard, 1970)	$3,1 \pm 1,8$ (ce travail)	$3,0 \pm 0,7$ (Briat et al. 1974)	$2,7 \pm 0,5$ (ce travail)

Tableau 21. : Comparaison des résultats obtenus dans ce travail au Pôle Sud avec des études antérieures, pour le sodium et le chlore.

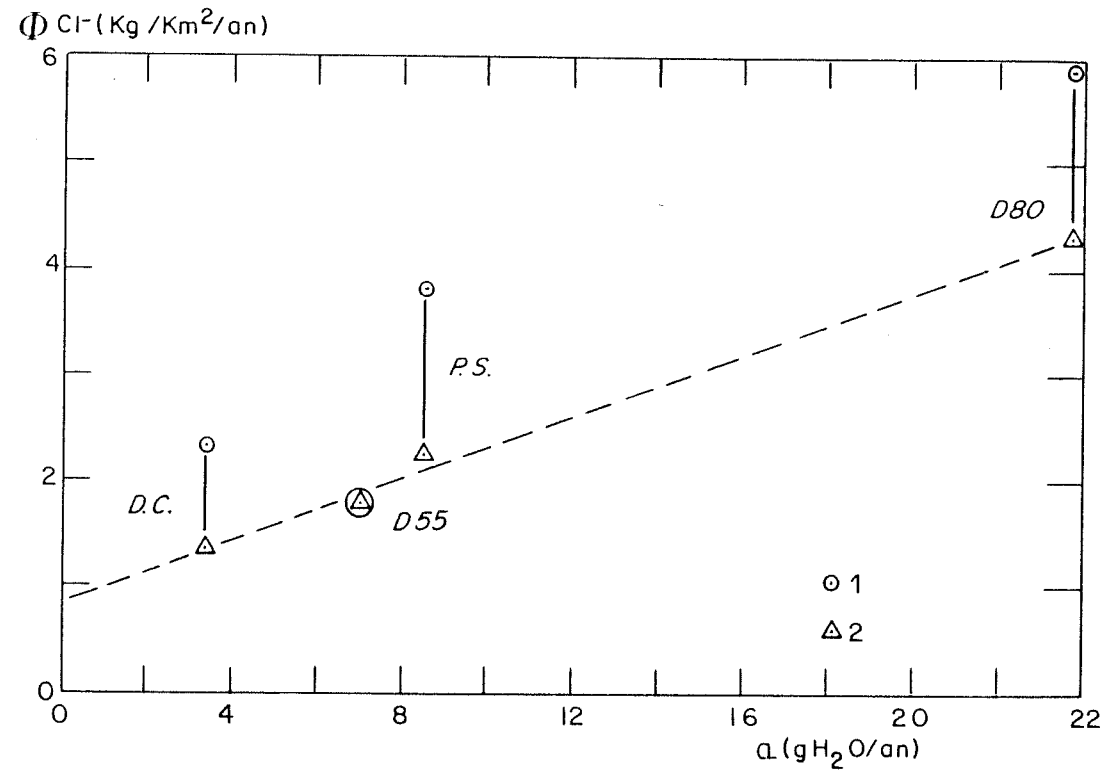


Figure 46 : Variations du flux de retombées annuel moyens de chlore (1) entre 1959 et 1969 pour différents sites de l'Antarctique de l'Est, en fonction du taux d'accumulation. Nous avons reporté les flux de retombées de chlore (2) calculés à partir des flux observés en sodium et en supposant le rapport de l'eau de mer respecté.

2.4.1.4. Variations séculaires au Dôme C

L'étude des couches de neige déposée au Dôme C depuis 1860 (de 0 à 9,5 m de profondeur) montre que le rapport Cl/Na très élevé observé en ce site sur la période 1959-1969 ($3,9 \pm 3,5$ voir tableau 17, paragraphe 2.2.2.) n'est pas une constante (voir figure 47).

L'accident apparaissant sur le profil Cl/Na (valeur de Cl/Na atteignant 40 autour de 7 m de profondeur, voir figure 47) sera interprété en terme de volcanisme local (éruption de la Thomson-Island : voir plus loin, paragraphe 3). Mis à part cet accident, la figure 48 fait apparaître une augmentation d'un facteur trois environ de la teneur en chlore depuis le début du siècle mais il faut se garder d'avancer une explication liée à des problèmes de pollution globale. En effet, de tels phénomènes se sont déjà produits à des époques beaucoup plus anciennes.

2.4.1.5. Comparaison de la période holocène à Byrd, D 10, Dôme C et Vostok

Comme pour le sodium, il était intéressant d'une part d'étendre notre couverture géographique de l'Antarctique de l'Est à l'étude du site de Vostok, d'autre part d'étudier le site de Byrd en Antarctique de l'Ouest. Les profils obtenus à Byrd, D 10, Dôme C et Vostok sur les 15 000 dernières années (0 à 11 000 BP : période holocène, 11 000 - 15 000 BP : transition) sont présentés en figure 49.

Aux erreurs expérimentales près, le rapport Cl/Na à Byrd et D10 reste très proche de la valeur de l'eau de mer. Par contre, au Dôme C et à Vostok, sites tous deux situés à plus de 3 000 m d'altitude et à plus de 1 000 km de la mer, le rapport est très variable suivant les périodes de temps considérées. En effet, ce rapport tout d'abord très faible il y a 15 000 ans (début de la dernière transition climatique), augmente sensiblement au tout début de la période holocène (8 000 - 10 000 BP) pour diminuer de nouveau par la suite. Ce rapport Cl/Na faible semble alors rester une caractéristique constante jusqu'à début de ce siècle. D'autre part, il semble que ce rapport (bien que systématiquement plus faible à Vostok qu'au Dôme C) évolue parallèlement en ces deux sites distants de quelques cinq cents kilomètres.

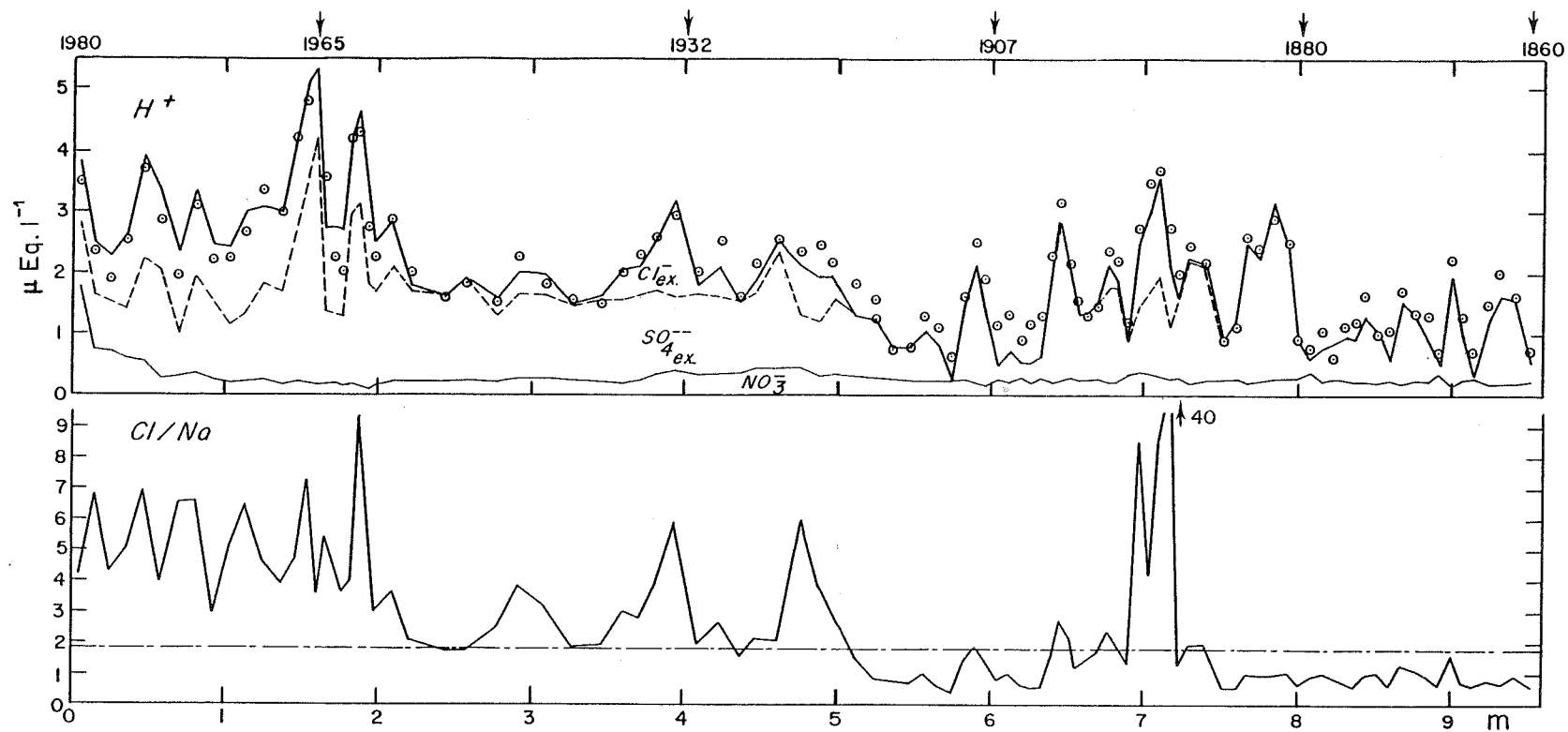


Figure 47 : Rapport Cl/Na et reconstitution de l'acidité au Dôme C entre 0 et 9,50 m de profondeur (période 1860-1980), \odot représente l'acidité mesurée.

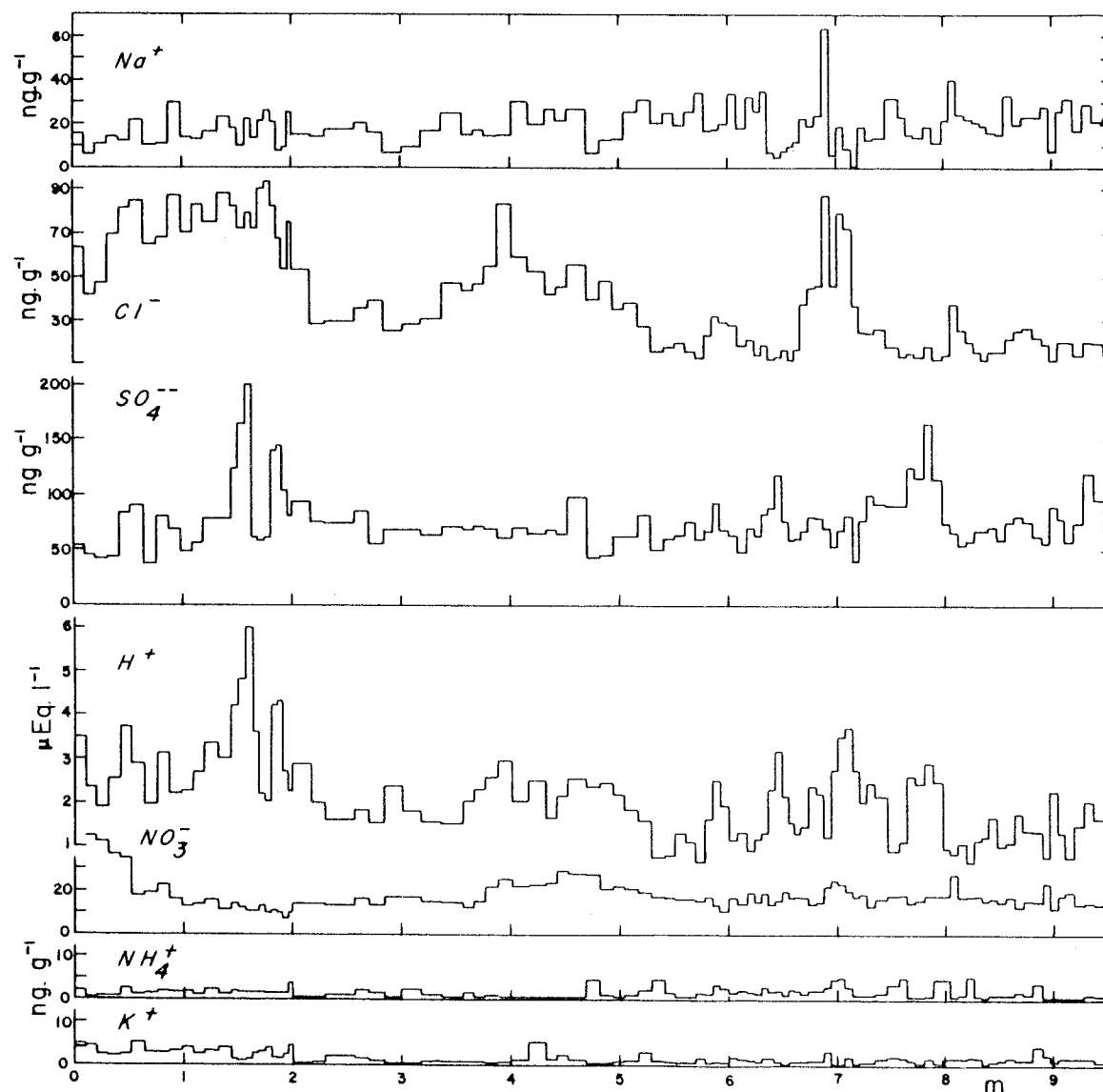


Figure 48: Profils d'ions majeurs (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , H^+ , NO_3^- , NH_4^+ et K^+) entre 0 et 9,50 m de profondeur au Dome C.

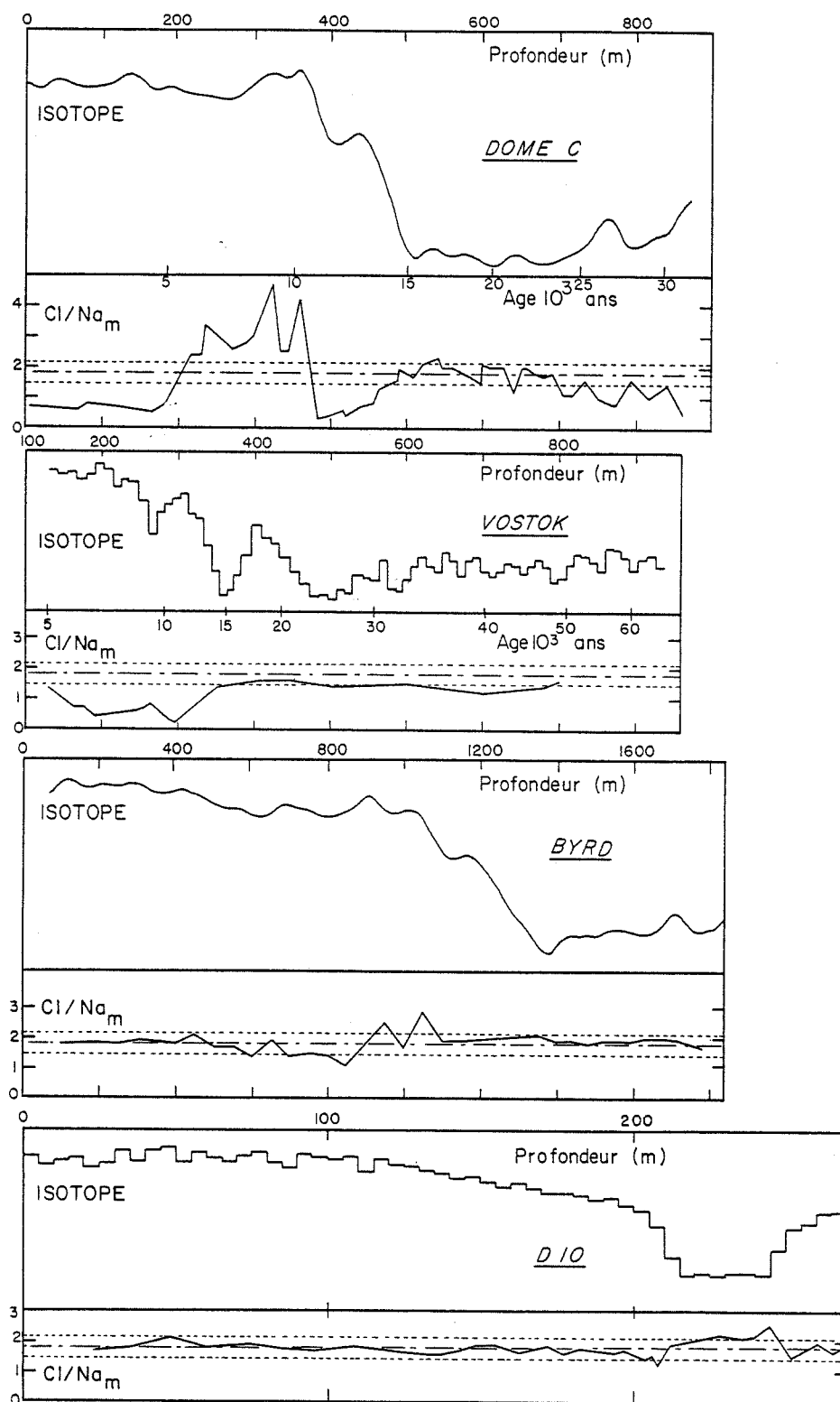


Figure 49 : Evolution du rapport Cl/Na_m de la neige, au cours du dernier grand changement climatique, au Dôme C, à Vostok, Byrd et D 10. Les profils isotopiques ($\delta^{18}O$) reportés dans chaque cas mettent en évidence la période chaude actuelle (à gauche) et la fin de la dernière glaciation (à droite).

2.4.2. Synthèse des résultats

Que ce soit sur la période récente (1959-1969) ou bien sur une période de temps plus grande (0-15 000 BP), cette étude fait apparaître que le rapport Cl/Na de la neige reste voisin de 1,8 pour les sites les plus côtiers de la Terre Adélie (tout au moins en-dessous de 2 000 m d'altitude environ) et pour le site de Byrd en Antarctique de l'Ouest. A l'inverse, dans les sites les plus continentaux comme Dôme C, Vostok et même Pôle Sud, ce rapport est très différent de 1,8. Durant la période récente (1959-1969) les différences du rapport Cl/Na de la neige avec la valeur de l'eau de mer apparaissent bien marquées durant l'été austral qui correspond à une période de circulation océanique faible vers le plateau antarctique.

Rappelons enfin que notre étude de la chimie des couches de neige (chapitre 3) a montré que les rapports Cl/Na élevés correspondaient à la présence d'acide chlorhydrique, les rapports Cl/Na faibles à des retombées de sel de mer enrichi en sulfate.

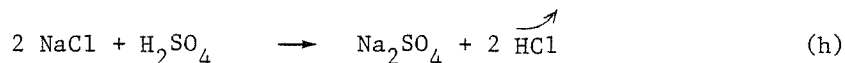
2.4.3. Discussion

2.4.3.1. Examen des différentes sources d'HCl possibles

L'aérosol marin primaire se forme à la surface de l'océan sous l'action des vagues et du vent. Au moment de leur injection dans l'atmosphère, les particules nouvellement formées contiennent du chlore et du sodium dans le même rapport que celui de l'eau de mer. De nombreuses études, réalisées en atmosphère marine, montrent qu'ultérieurement, cet aérosol s'altère, présentant généralement des rapports Cl/Na inférieurs au rapport de l'eau de mer (Junge 1963 ; Duce 1969 ; Chesselet et al. 1972 ; Martens et al. 1973 ; Hitchcock et al. 1980 ; Kritz et Rancher 1980). Cependant dans d'autres travaux, on n'observe qu'un écart très faible ou négligeable (Duce et al. 1965 ; Buat-Ménard et al. 1974 ; Gordon et al. 1977 ; Huebert et Lazrus 1980).

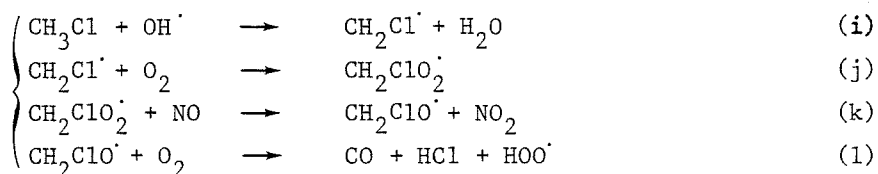
Par ailleurs, un composé chloré minéral (probablement HCl) a souvent été mis en évidence en atmosphère marine (Duce et al. 1965 ; Chesselet et al. 1972 ; Kritz et Rancher 1980). Pour rendre compte des différences observées entre le rapport Cl/Na de l'aérosol et celui de l'eau de mer d'une part, de la présence de chlore en phase gazeuse d'autre part, il a été suggéré que les particules de sel de mer, suite à leur déshydratation et leur

acidification par certains gaz traces acides (SO_2 ou même NO_x), perdaient du chlore par libération d'acide chlorhydrique (Eriksson 1959 ; Robins et al. 1969 ; Duce 1969). Le mécanisme de cette altération, bien qu'étant encore assez mal compris, semble pouvoir se traduire schématiquement par la réaction :



Des études réalisées en chambre atmosphérique d'une part (Yue et al. 1976), en atmosphère marine d'autre part (Duce 1969 ; Chesselet et al. 1972 ; Kritz et Rancher 1980) ont permis d'évaluer cette source potentielle d'acide chlorhydrique (tableau 22).

Dans la troposphère, outre le dégazage du sel de mer, l'acide chlorhydrique peut être introduit par d'autres sources telles que l'activité humaine (Robinson et Robbins 1968) et les éruptions volcaniques (Cadle 1980 ; Devine et al. 1984). De plus, la destruction photochimique du chlorure de méthyle (CH_3Cl) (voir réaction ci-dessous), émis essentiellement depuis la surface de l'océan (Zafiriou 1975), est également à prendre en considération.



En Antarctique, les études antérieures ont mis également en évidence une perte relative de chlore dans l'aérosol et suggéré la présence de chlore gazeux dans l'atmosphère (Cunningham et Zoller 1981 ; Maenhaut et al. 1979 ; Duce et al. 1973). Plusieurs interrogations subsistent néanmoins : la réaction (h) se produit-elle effectivement dans l'atmosphère ou bien tout simplement sur le filtre utilisé dans les prélèvements et chargé en particules de sel de mer ? (Prospero et al. 1983).

Afin d'évaluer l'importance relative des différentes sources potentielles pour les retombées d'acide chlorhydrique en Antarctique, nous avons tout d'abord comparé (tableau 22) les flux d'émissions estimés pour les différentes sources envisagées précédemment.

Emissions anthropogéniques		3 MT	Cicerone 1981
Photochimie de CH_3Cl		2 à 3 MT	Singh et al. 1979 Graedel 1979 Cicerone 1981
Volatilisation de HCl à partir du sel de mer		600 MT 200 MT 173 à 932 MT 100 MT	Duce 1969 Chesselet et al. 1972 Yue et al. 1976 Kritz et Rancher 1980
source volcanique	Activité moyenne continue	3,0 à 7,8 MT	Cadle 1980 Ryan et Mukherjee 1974
	Grandes éruptions	Agung (1,5 MT) Krakatoa (3,8 MT) Tambora (216,0 MT)	Devine et al. 1984
	Activité de l'Erebus	0,09 à 0,68 10^{-3} MT	(voir texte)

Tableau 22 : Estimation des flux annuels d'émission des différentes sources potentielles de HCl

Bien que le dégazage du sel de mer apparaît être la plus importante source d'HCl, il semble toutefois nécessaire de discuter les autres sources si l'on envisage un transport longue distance des composés chlorés (HCl ou CH_3Cl) vers le continent antarctique.

La source anthropogénique ne représente que 0,3 à 3 % des émissions troposphériques d'acide chlorhydrique. Dû à sa grande solubilité dans l'eau, l'acide chlorhydrique émis dans les basses couches de la troposphère est rapidement repris par les précipitations et seule une faible fraction de l'émission pourra atteindre la troposphère libre. Ainsi une contribution de la source anthropogénique par un transport longue distance vers les hautes latitudes est peu vraisemblable, même si l'on considère un temps de résidence de 7 jours (Stedman et al. 1975) dans la haute et moyenne troposphères. Le profil obtenu au Dôme C (figure 47) montre une augmentation du dépôt d'acide chlorhydrique après 1910 environ, mais nous observons le même phénomène en ce site pour des périodes de temps beaucoup plus lointaines (entre 6.000 et 10.000 B.P., voir figure 49). L'interprétation

de cette tendance sur le siècle au Dôme C en terme d'augmentation des émissions anthropogéniques semble donc très hasardeuse. Outre l'acide chlorhydrique, l'activité humaine émet des oxydes d'azote et des dérivés soufrés, précurseurs gazeux des acides nitrique et sulfurique. Ni les retombées de HNO_3 , ni les retombées de H_2SO_4 n'augmentent au cours du dernier siècle au Dôme C (voir plus loin paragraphes 3 et 4). Nos résultats excluent donc l'hypothèse d'une contribution significative des émissions anthropogéniques au budget antarctique de l'acide chlorhydrique.

L'activité volcanique moyenne émet de manière continue de l'HCl et ceci dans des proportions du même ordre de grandeur que la source anthropogénique (tableau 22). Cette source devrait donc n'avoir, en général, qu'un faible impact pour l'atmosphère antarctique. Le Mont Erebus situé sur l'île de Ross en Antarctique (voir figure 17) est actuellement le seul volcan en phase éruptive permanente (lac de lave, fumerolles). Les quantités de débris émis par ce volcan sont faibles par rapport aux émissions d'autres volcans, il mérite cependant une attention particulière du fait qu'il est situé sur le continent antarctique. De fait, certains auteurs suggèrent que les émissions de l'Erebus peuvent contribuer dans une large mesure à l'aérosol antarctique (en particulier pour le sulfate, Radke 1982) tandis que d'autres auteurs considèrent cette source comme négligeable (Delmas 1982 ; Polian et Lambert 1979). Par ailleurs, Shaw 1983 avance l'hypothèse d'une contribution du panache de l'Erebus pour le chlore et le silicium observé dans l'aérosol du Pôle Sud. Les filtrations d'air effectuées dans le panache en novembre 1978 montrent une teneur en chlore de $230 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Buat-Ménard, communication personnelle). En se référant au flux global de gaz émis par le cratère ($4 \cdot 10^{11} \text{ m}^3/\text{an}$, Polian et Lambert, 1979) nous pouvons déduire une estimation du flux d'acide chlorhydrique émis égal à 92 tonnes par an (à comparer aux 1000 tonnes par an de sulfate, Polian et Lambert, 1979). Une autre étude, réalisée deux ans plus tard, (novembre 1980) fait état d'une émission plus consistante (40.000 tonnes/an, Radke 1982) à partir des mesures de chlore également réalisées durant cette campagne ; nous obtenons cette fois un flux d'émission de $680 \text{ tonnes}/\text{an}$ d'HCl. Ainsi, même en prenant la plus forte estimation de la masse d'acide chlorhydrique émise et en supposant que la totalité retombe sur l'Antarctique, nous obtenons une retombée moyenne voisine de $0,05 \text{ kg}/\text{km}^2/\text{an}$, ce qui reste insignifiant

devant la retombée de chlore en excès observée actuellement dans les régions centrales ($1 \text{ à } 2 \text{ kg/km}^2/\text{an}$, voir figure 46). Notons par ailleurs que les retombées d'acide chlorhydrique sont particulièrement importantes durant la période récente (figure 47), ce qui ne semble pas correspondre à une période d'activité particulièrement forte de l'Erebus. A l'inverse, Ross note que le panache de ce volcan était important en 1841; or, nous n'observons pas de tendance simultanée sur nos profils (voir figure 63^{''}, profondeur de la couche 1841 se situant vers 11 mètres de profondeur). Ainsi, tant les calculs de flux d'émissions que les variations d'activité du Mont Erebus permettent d'écarter sa possible contribution en acide chlorhydrique pour la neige antarctique.

Les volcans, en période d'activité explosive, peuvent émettre des quantités d'acide chlorhydrique plus conséquente (voir tableau 22). Notre étude du paléovolcanisme sur les 200 dernières années montrera cependant que, mis à part le cas très particulier de la Thomson Island, les volcans tels que l'Agung, le Krakatoa et le Tambora ne devraient pas être considérés comme une source importante d'acide chlorhydrique dans la neige antarctique (voir paragraphe 3).

Parmi les autres sources d'acide chlorhydrique envisagées restent donc la destruction du chlorure de méthyle et le dégazage éventuel du sel de mer. Nous ne pouvons pas discuter directement l'importance pour la neige antarctique de ces deux sources au seul vu des estimations du flux d'émissions. En effet, dans le premier cas, nous avons affaire à un précurseur gazeux émis par la surface des océans dont le temps de résidence dans la troposphère est grand (estimé à un an par Logan et al. 1981, à deux ans par Singh et al. 1979); dans le second cas, il s'agit d'un dégazage de particules ayant lieu dans certaines conditions ($\text{pH} \leq 1-3$).

Il nous est apparu plus raisonnable de comparer les apports de CH_3Cl dans l'atmosphère antarctique avec celles du dioxyde de soufre qui provient également de l'océan (activité biogénique) et dont le temps de résidence dans la troposphère antarctique a été estimé à 50 jours environ par Delmas (1982). Ce dernier propose une injection annuelle de dérivés soufrés (SO_2 et SO_4) égale à 1,5 MT (exprimée en masse de sulfate) (à comparer aux 100 MT de SO_4 émis globalement par les océans). Si on admet que les 2 MT de CH_3Cl émis annuellement par la surface de l'océan retombent de manière homogène, nous obtenons une injection de 0,04 MT d' HCl dans l'atmosphère antarctique. Ces considérations semblent indiquer que la

photochimie des composés organochlorés serait une source peu importante de chlore pour la neige antarctique. Parmi les variations spatio-temporelles du rapport $\text{Cl}/_{\text{Na}}$ de la neige, seules les variations saisonnières observées à la station Pôle Sud (voir paragraphe 2.4.1.3.) semblaient a priori appuyer l'hypothèse de l'importance de cette source. Les retombées plus importantes d'acide chlorhydrique durant l'été pouvaient en effet être expliquées par une destruction photochimique du CH_3Cl favorisée par les conditions estivales. Par contre, si l'existence de cette source pouvait rendre compte des rapports $\text{Cl}/_{\text{Na}}$ supérieurs au rapport de l'eau de mer, le problème restait entier pour les périodes où ce rapport est très inférieur à 1,8.

2.4.3.2. Le rapport $\text{Cl}/_{\text{Na}}$: un indice de continentalité antarctique

Dans ce paragraphe, nous allons voir que nos résultats obtenus dans la neige appuient bien l'hypothèse d'une altération de l'aérosol marin au cours de son transport depuis l'océan jusque dans les régions centrales de l'Antarctique. Le rapport $\text{Cl}/_{\text{Na}}$ proche de la valeur de l'eau de mer n'est observé que dans les régions côtières de l'Antarctique de l'est et dans l'Antarctique de l'ouest. Dans les régions les plus continentales de l'Antarctique de l'est (Dôme C, Vostok) le rapport est très différent de la valeur de l'eau de mer (tantôt supérieur, tantôt inférieur). Ces variations géographiques du rapport $\text{Cl}/_{\text{Na}}$ de la neige peuvent s'expliquer en considérant que dans les régions côtières et, d'une manière plus générale, dans les régions fortement soumises à l'influence océanique (comme l'Antarctique de l'ouest) nous retrouvons dans la neige des impuretés issues d'un sel de mer en quelque sorte fraîchement émis dont la composition reste très voisine de celle de l'eau de mer. A l'inverse, dans les sites centraux, nous avons affaire à un aérosol qui a vieilli en cours de transport et qui s'est altéré suivant la réaction (h).

Cette hypothèse permet également de rendre compte des variations saisonnières du rapport $\text{Cl}/_{\text{Na}}$ dans la neige déposée au Pôle Sud. En effet, les couches de neige déposées en hiver contiennent beaucoup de sodium (voir figure 45) et ceci en liaison avec une invasion plus vigoureuse des masses d'air d'origine océanique, simultanément nous observons un rapport $\text{Cl}/_{\text{Na}}$ proche du rapport marin. Par contre, durant l'été, ces masses d'air pénètrent peu sur le continent, les impuretés d'origine marine présentent alors

les caractéristiques d'un aérosol vieilli. A ce propos, il est intéressant de remarquer que durant l'hiver 1975 les mesures de sodium et de chlore effectuées sur l'aérosol au Pôle Sud (Cunningham et Zoller, 1981) font apparaître un rapport égal à 1,7, ces auteurs obtenant un rapport plus faible (1,3) durant l'été et notant la présence de chlore en phase gazeuse. Cette remarque nous rappelle que les résultats obtenus dans la neige sont en fait des moyennes qui intègrent les particules et le dépôt éventuel de gaz comme HCl. Aussi, lorsque nous observons un rapport $\text{Cl}/_{\text{Na}}$ supérieur à 1,8 dans la neige, il peut aussi bien s'agir d'une retombée simultanée de NaCl et de HCl que d'une retombée de NaCl, Na_2SO_4 et de HCl.

De même, et sans trop anticiper sur le chapitre 5, nous verrons que durant la dernière période glaciaire qui est caractérisée par une circulation atmosphérique plus vigoureuse qu'actuellement, le rapport $\text{Cl}/_{\text{Na}}$ devient égal au rapport de l'eau de mer même dans les sites les plus continentaux comme Dôme C et Vostok.

L'ensemble de ces observations (variations géographiques, variations saisonnières et variations avec le grand changement climatique d'il y a 15 000 ans) appuient la notion d'aérosols marins frais (non fractionnés) et d'aérosols marins vieillis (ou altérés). Ces résultats sont en bon accord avec une étude antérieure des paramètres influençant la réaction d'altération du sel de mer en "atmosphère acide" (en particulier l'âge des nuages, Yue et al. 1976).

2.4.3.3. Incorporation de l'acide chlorhydrique dans la neige

Comme nous venons de le voir, l'interaction entre le sel de mer et les composés soufrés présents dans l'atmosphère de ces régions se traduit, dans certaines conditions, par une perte de chlore des particules de sel de mer. Cette perte s'effectuant par émission d'acide chlorhydrique à l'état gazeux.

Dans ce cas, nous retrouvons dans la neige, non seulement des particules de sel de mer appauvries en chlore, mais également de l'acide chlorhydrique. Le mécanisme de transfert de ce gaz acide depuis l'atmosphère jusque dans la neige n'est pas évident, une des principales questions étant tout d'abord de savoir s'il s'agit d'un piégeage du gaz dans le névé au moment de la fermeture des pores ou bien d'une retombée (sèche ou humide) dans la neige.

Pour traiter ce premier point, nous disposons de la variation saisonnière d'acide chlorhydrique au Pôle Sud entre 1949 et 1953, période durant laquelle le remaniement des couches de neige par le vent a été peu important (voir paragraphe 2.4.1.3.). La teneur en acide chlorhydrique, faible durant l'hiver,

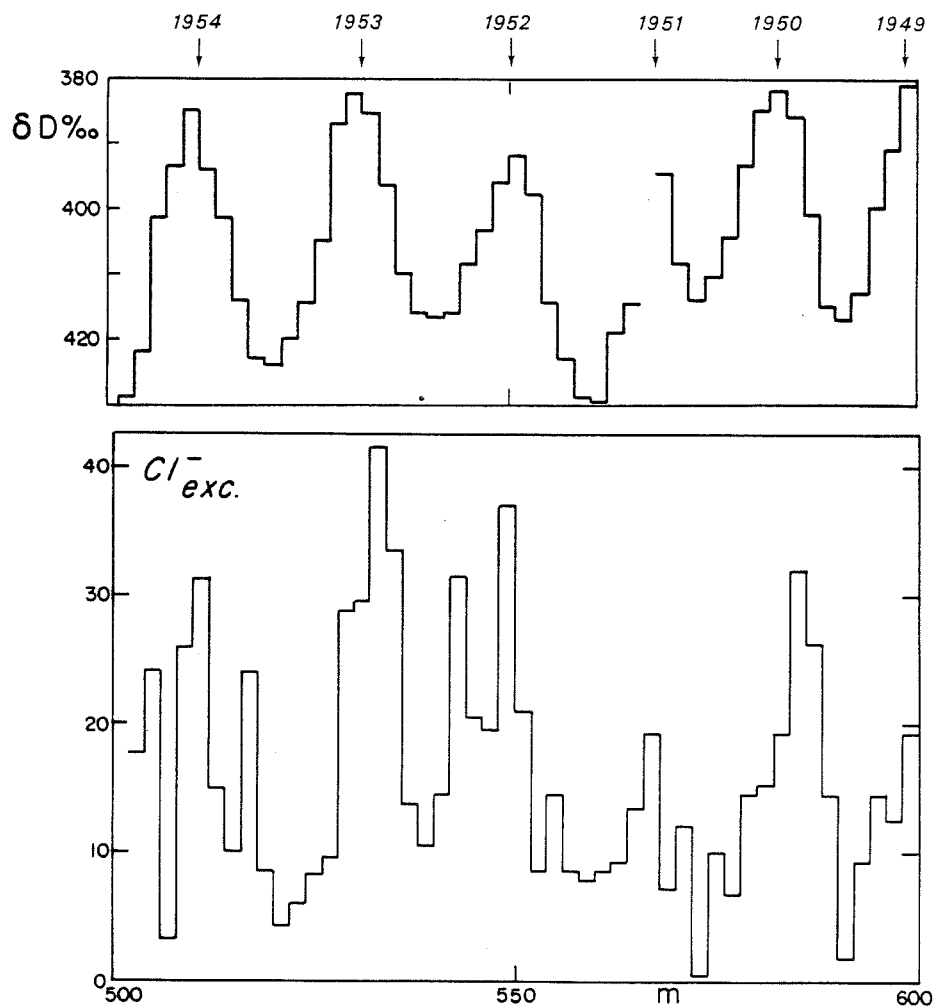


Figure 50 : Variations saisonnières de la quantité de chlore en excès présent dans le névé au Pôle Sud (période 1949-1953, soit entre 5 et 6 m de profondeur).

(1 à 10 ng.g⁻¹) atteint 30 à 40 ng.g⁻¹ en été. Un tel gradient de concentration (voisin de 1 µEq.l⁻¹) se retrouvant dans le névé encore très poreux (densité voisine de 0,5) suggère que nous n'avons pas affaire à un mécanisme de piégeage de HCl dans les interstices du névé (jusqu'à cette profondeur le névé est encore en contact direct avec l'atmosphère). Nous pouvons donc déjà considérer que les variations enregistrées dans les couches de neige et de gaz sont effectivement le reflet des variations atmosphériques.

Pour expliquer le piégeage de HCl dans (ou sur) la précipitation, plusieurs hypothèses peuvent être envisagées :

- piégeage dans l'atmosphère par les flocons de neige au moment de la nucléation,
- fixation dans l'atmosphère par d'autres impuretés ou sur les petits cristaux, en suspension dans l'air, particulièrement dans les régions centrales,
- solubilisation du gaz dans l'eau en surfusion présente dans l'atmosphère même dans ces régions,
- dépôt par impaction à la surface de la neige,
- dépôt par adsorption sur la surface.

Il serait déjà intéressant de pouvoir distinguer le type de piégeage (dépôt sec ou dépôt humide). Malheureusement, l'étude des flux de retombées en fonction du taux d'accumulation n'est, dans ce cas précis, pas suffisante, car l'effet géographique risque d'être trop important. La question du mécanisme du piégeage de l'acide chlorhydrique reste donc ouverte. Des expérimentations faciles à réaliser sur le terrain durant la saison d'été devraient cependant faire avancer rapidement cette question.

La comparaison des rapports Cl/_{Na} dans la neige du Dôme C et de Vostok pour la période holocène (figure 49) semble indiquer que l'acide chlorhydrique retombe plus vite dans la neige que les particules de Na₂SO₄, comme le suggèrent les rapports Cl/_{Na} plus faibles à Vostok qu'au Dôme C. Nous ne sommes cependant pas en mesure actuellement d'expliquer pourquoi en un site donné (comme le Dôme C) le rapport Cl/_{Na} varie de part et d'autre de la valeur de l'eau de mer indiquant tantôt un excès de chlore, tantôt un excès de sodium. Pour ce faire il nous manque une meilleure connaissance des paramètres météorologiques (humidité, vitesse du vent, trajection des masses d'air océaniques) et des mécanismes de dépôt de l'acide chlorhydrique.

3 - VARIATIONS DES TENEURS EN ACIDE SULFURIQUE

Des études antérieures ont montré que les grosses éruptions volcaniques pouvaient être suivies de retombées d'acide sulfurique dans les régions polaires. Mises à part ces fluctuations importantes mais courtes, l'acide sulfurique semble demeurer une composante importante du "bruit de fond d'acide" dans la neige. Dans ce paragraphe, nous allons tout d'abord étudier ce "bruit de fond d'acide sulfurique" non volcanique. Puis l'étude de la composante volcanique sera étendue à l'étude plus générale du paléovolcanisme sur les deux cents dernières années.

3.1. BRUIT DE FOND D'ACIDE SULFURIQUE D'ORIGINE NON VOLCANIQUE

3.1.1. Variations géographiques

3.1.1.1. Variations sur les quatre cents premiers kilomètres de de l'axe Dumont d'Urville-Dôme C

Pour chaque échantillon, nous avons calculé la teneur en acide sulfurique, notée $SO_4^{--\star}$ ex. (excès de sulfate sous forme acide), soit à l'aide de l'équation (1) lorsque $Cl/Na \geq 1,8$, soit à l'aide de l'équation (15) lorsque $Cl/Na \leq 1,8$ (voir paragraphes 4.3 et 4.4, chapitre 3). Les teneurs en sulfate obtenues sur la série d'échantillons de surface prélevés en Janvier 1983 entre Dumont d'Urville et D 80 sont présentées en figure 51.

fate. Notons que la date des prélèvements (janvier 1983) nous permet de considérer que la couche de neige échantillonnée en surface n'était pas encore contaminée significativement par les retombées de l'éruption du El Chichon (17°N, Avril 1982). En effet, un délai de neuf mois entre l'éruption de ce volcan et la date de la collecte de neige en Antarctique semble trop court si l'on se réfère au délai observé (neuf mois, voir paragraphe 3.2.3.) pour l'arrivée des premières retombées au Pôle Sud de l'éruption du Mont Agung (1963). De plus, ce dernier était situé dans l'hémisphère sud (8°S au lieu de 17°N pour El Chichon). D'autre part, le nuage

de débris volcaniques constitué dans la stratosphère après l'éruption d'El Chichon semble avoir subi un blocage inattendu (Rampino et Self, 1984) dans son extension en latitude puisque, près de six mois après l'éruption (soit en Octobre 1982), le gros du nuage était encore confiné entre 10° S et 65° N (Gooding et Clanton, 1983). Nous pourrions donc considérer nos mesures de sulfate comme représentatives d'une période non volcanique.

Les flux de retombées annuelles d'acide sulfurique (Φ) (voir tableau 16), malgré une certaine dispersion (aisément explicable, voir paragraphe 2.2.1.), semblent significativement corrélés au taux d'accumulation annuel moyen (a) (figure 52.A). En effet, pour seize points, le coefficient de corrélation liant (Φ) à (a) est de 0,60, ce qui reste significatif au seuil 95 % de confiance. Par contre, ni les concentrations (figure 51), ni les flux de retombées (figure 52.B) ne semblent dépendre de l'altitude du site (les coefficients de corrélation étant respectivement de - 0,18 et - 0,38). Ce résultat est en désaccord avec les conclusions d'une récente étude de Herron (1982) qui tend à montrer que les retombées de sulfate en excès en Antarctique décroissent lentement avec l'altitude du site. Cependant, notons tout d'abord que cet auteur utilise des valeurs de sulfate ne couvrant pas la même période de temps dans les différents sites, en particulier pour le site du Dôme C il utilise la valeur moyenne obtenue par Delmas et Boutron (1980) pour la période 1880-1970, période durant laquelle la teneur en sulfate est fortement influencée par l'activité volcanique (en particulier l'Agung et le Krakatoa). De toute façon, dans cette étude, l'excès de sulfate était calculé en utilisant le chlore comme élément de référence de l'aérosol marin primaire, ce qui ne semble pas correct pour l'Antarctique comme nous l'avons discuté précédemment (voir paragraphe 2.1.).

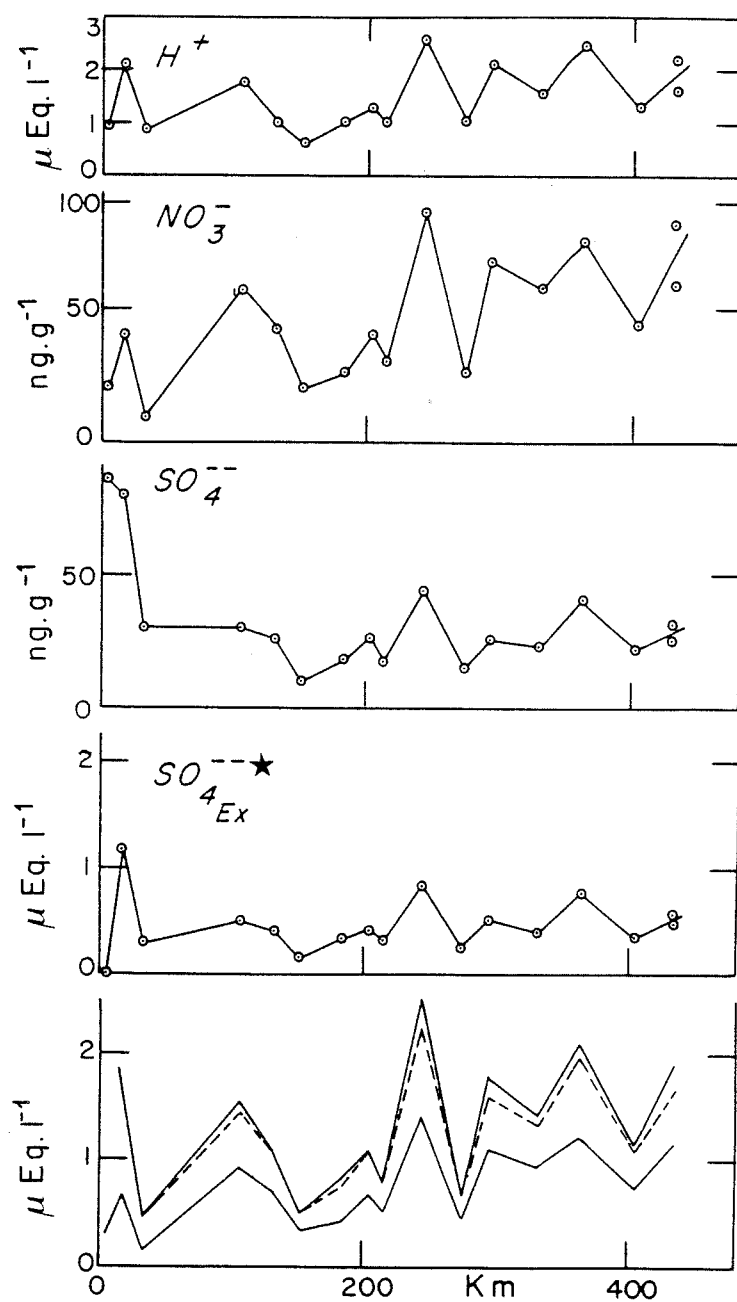


Figure 51 : Variations des concentrations en H^+ , NO_3^- , SO_4^{--} et SO_4^{--*} sur les quatre cents premiers kilomètres de l'axe Dumont d'Urville - Dôme C, la courbe du bas représente la reconstitution de l'acidité (HNO_3 , H_2SO_4 puis HCl).

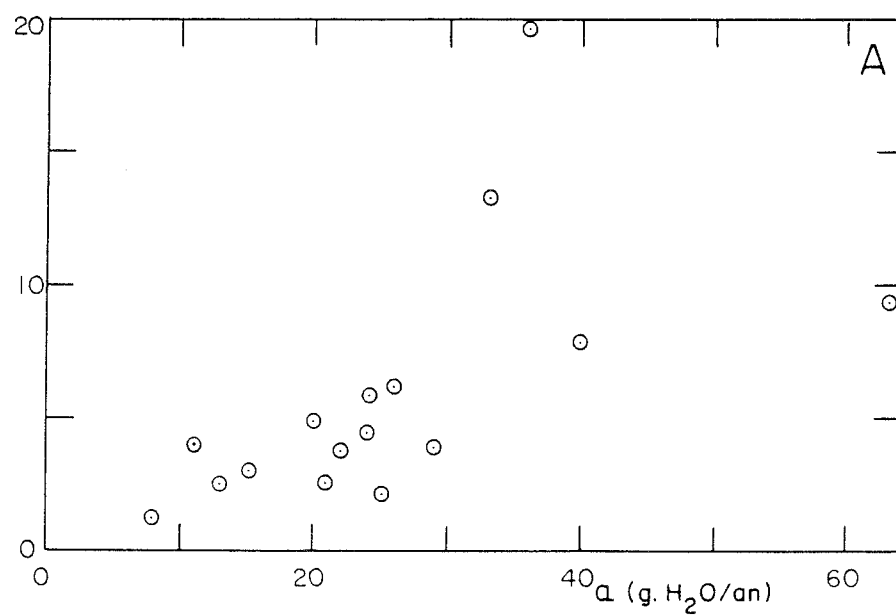
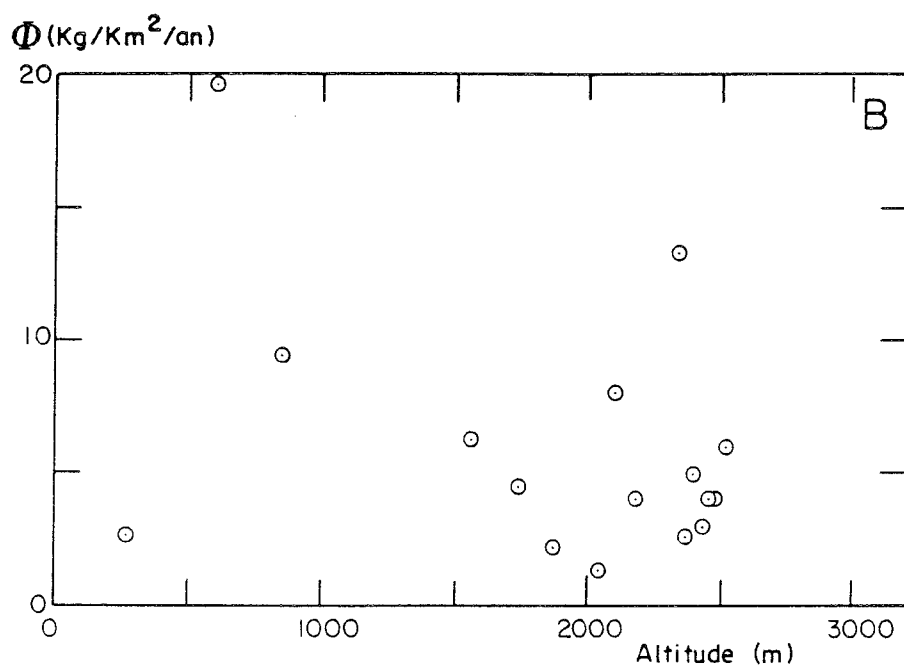


Figure 52 : Relation entre le flux de retombées annuel d'acide sulfurique en Terre Adélie, en fonction du taux d'accumulation (A), de l'altitude (B) du site.

3.1.1.2. Etude comparative de la neige à D 55, D 80, Dôme C et Pôle Sud (période 1959-1969)

Afin de quantifier de manière plus précise la relation liant le flux de retombées annuel moyen d'acide sulfurique (d'origine non volcanique) et le taux d'accumulation annuel, nous disposons de quatre profils couvrant la période 1959-1969 à D 55 (figure 53), D 80 (figure 54), Dôme C (figure 40) et Pôle Sud (figure 55). Cependant, nous verrons que les retombées de l'éruption du Mont Agung ont contaminé en acide sulfurique les couches de neige déposées en Antarctique entre 1964 et 1966 (voir la figure 55 et plus loin, les paragraphes 3.1.2. et 3.2.3.3.). Pour l'évaluation des flux de retombées d'acide sulfurique d'origine non volcanique, nous nous sommes affranchis de la contribution volcanique en ne considérant que les concentrations d'acide sulfurique qui intègrent les périodes 1959 à 1963 et 1966 à 1967 (périodes que nous pouvons considérer au vu des chronologies volcaniques comme des périodes exemptes de retombées importantes d'acide sulfurique d'origine volcanique).

Stations	$\text{SO}_4^{\text{--}\star} \text{ ex}$ (ng.g ⁻¹)	a (g.H ₂ O/an)	$\Phi \text{ SO}_4^{\text{--}\star} \text{ ex}$ (kg/km ² /an)	Altitude (m)
D 55	41,3	7,0	2,9	2028
D 80	33,6	23,7	6,7	2524
Dôme C	64,8	3,4	2,2	2850
Pôle Sud	44,2	8,5	3,8	3240

Tableau 23 : Evaluation des flux de retombées annuels d'acide sulfurique en différents sites de l'Antarctique de l'Est.

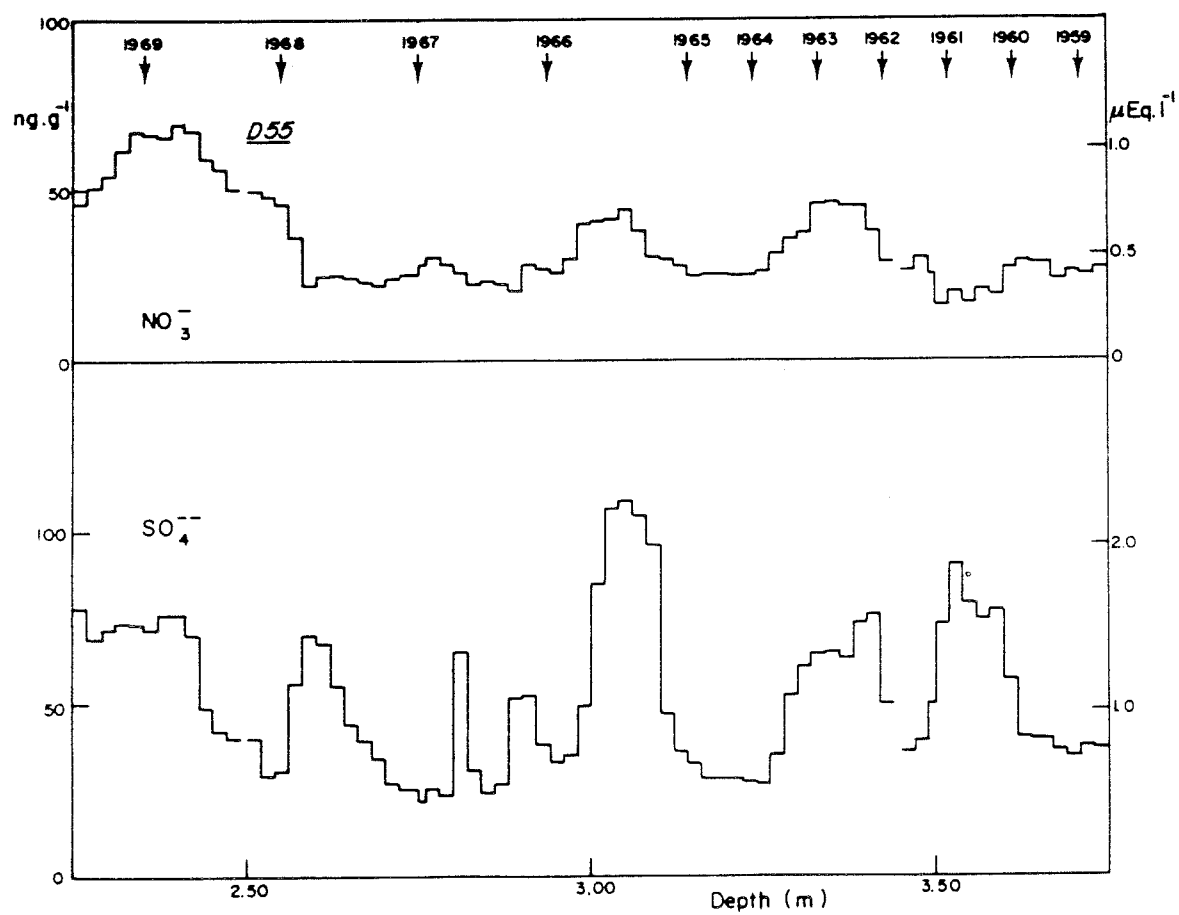


Figure 53 : Evolution de NO_3^- et SO_4^{--} dans la neige déposée entre 1959 et 1969 à D 55.

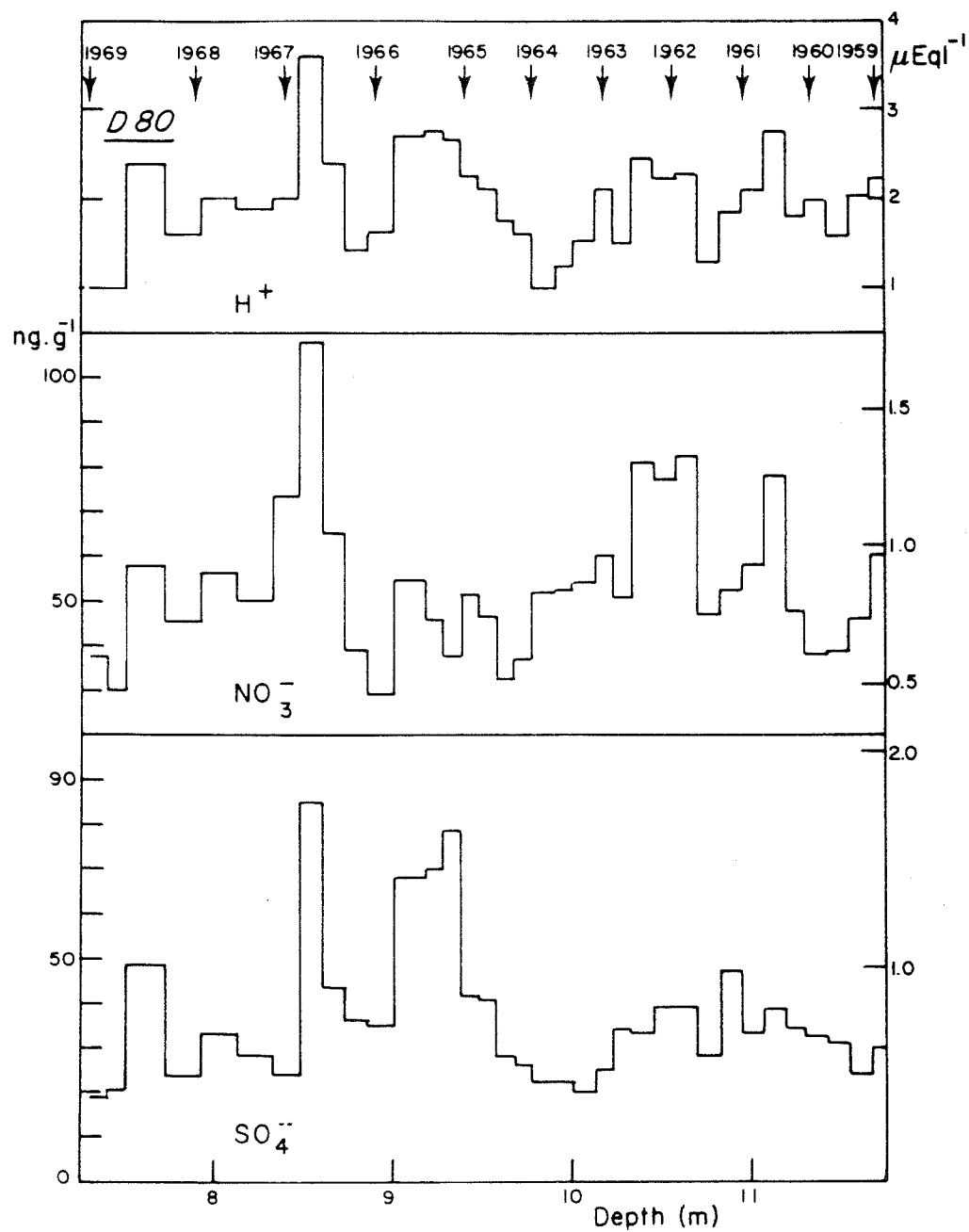


Figure 54 : Evolution de H^+ , NO_3^- et SO_4^{--} dans la neige déposée entre 1959 et 1969 à D 80.

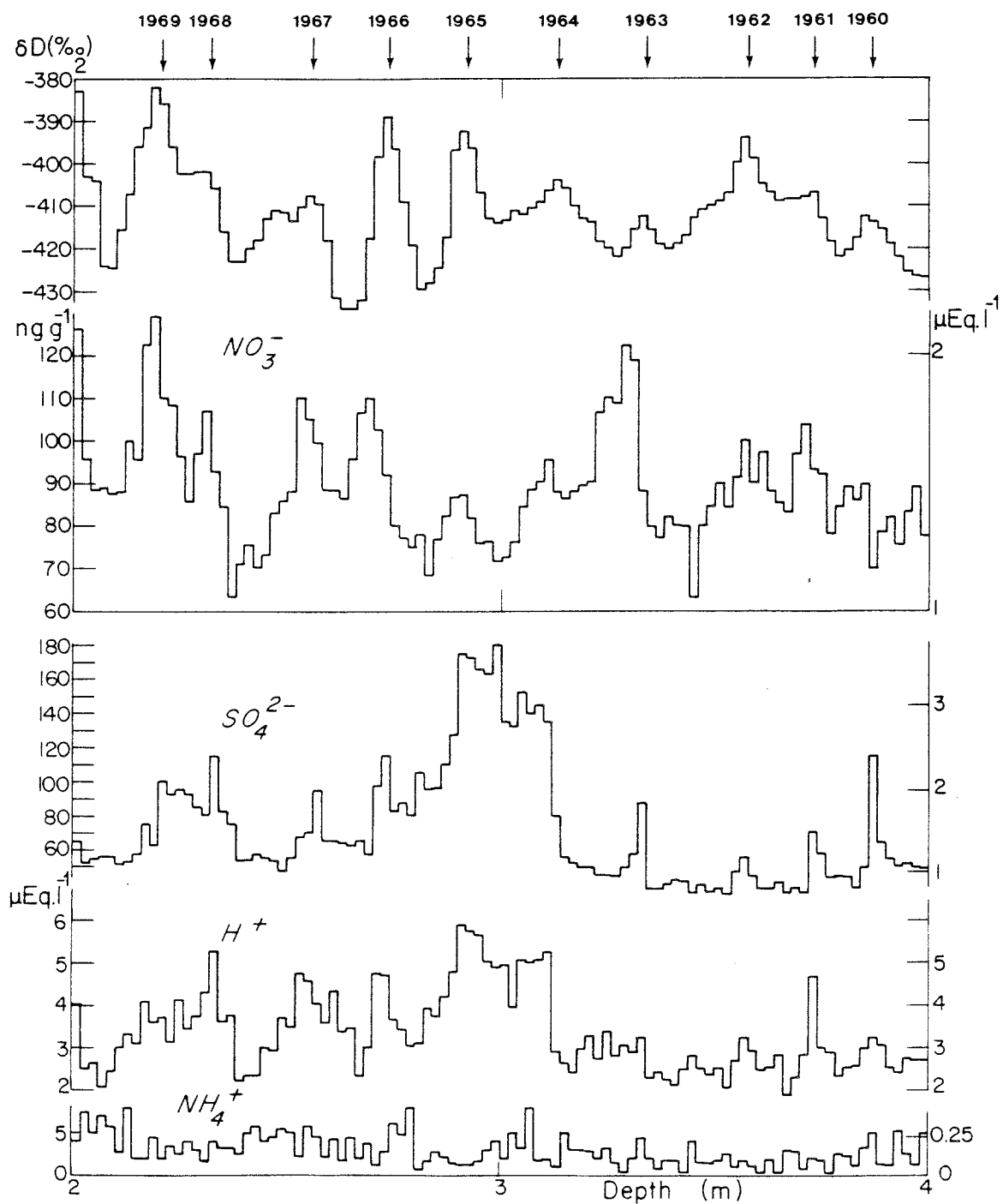


Figure 55 : Evolution de NO_3^- , SO_4^{2-} , H^+ et NH_4^+ dans la neige déposée entre 1959 et 1969 au Pôle Sud, la courbe du haut (teneur en deutérium, δD est de Jouzel et al. 1983).

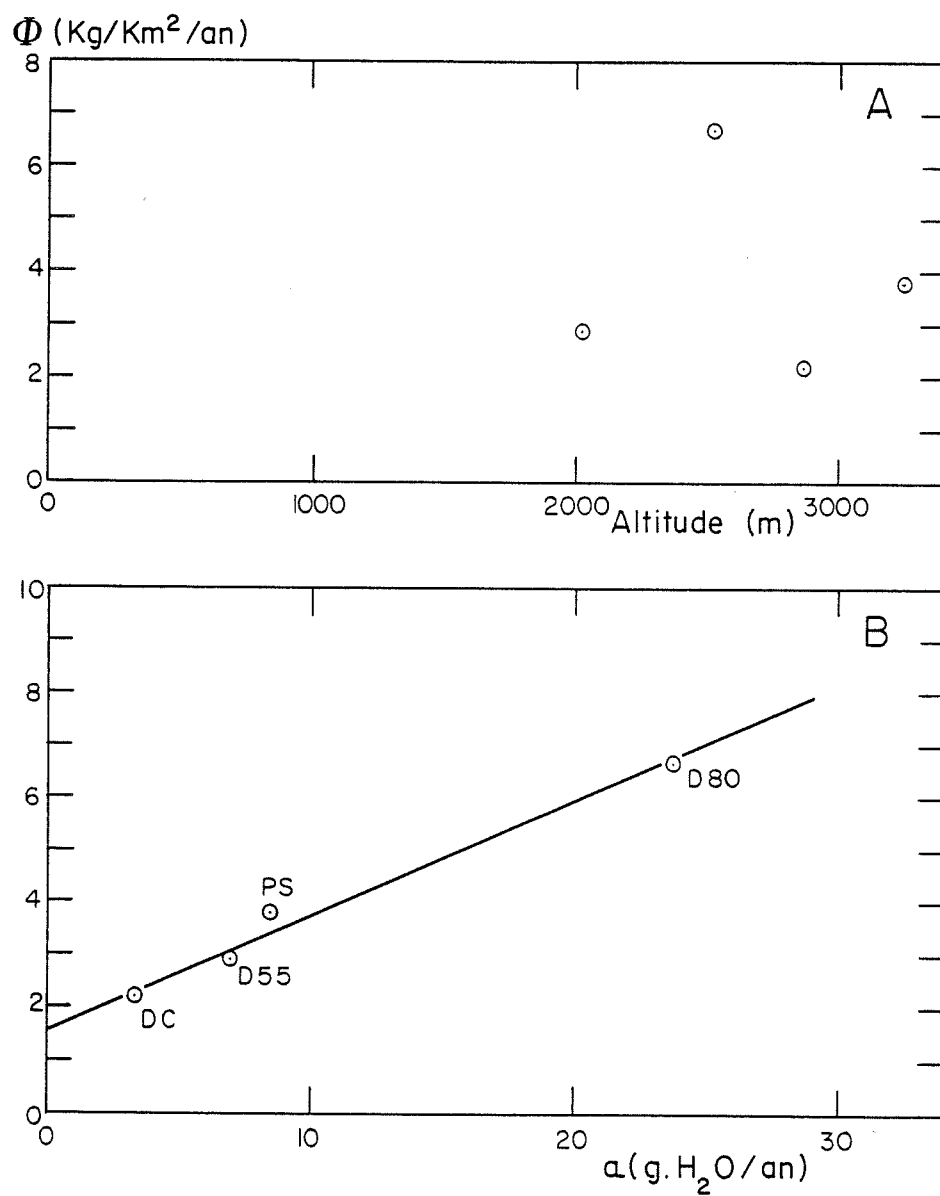


Figure 56 : Variations du flux de rebombées moyen annuel d'acide sulfurique entre 1959 et 1969 pour différents sites de l'Antarctique de l'Est, en fonction de l'altitude (A), du taux d'accumulation (B).

Les flux de retombées moyens ainsi obtenus (tableau 23) ne semblent pas présenter de variations systématiques avec l'altitude (voir figure 56 A, coefficient de corrélation $r = 0,0$), par contre, ils sont linéairement dépendants du taux d'accumulation annuel (a) (voir figure 56 B). La relation linéaire obtenue ($\Phi = 1,57 + 0,22 a$ avec $r = 0,99$) montre que, comme le sodium, il se produit des retombées sèches. Ce dépôt sec, qui correspond à l'ordonnée à l'origine obtenue (figure 56.B), représente respectivement 54% à D 55, 23% à D 80, 71% au Dôme C et 41% au Pôle Sud de la retombée totale d'acide sulfurique. La bonne relation linéaire entre le flux de retombées et le taux d'accumulation suggère que la teneur de l'atmosphère en acide sulfurique est homogène sur tout l'Antarctique de l'est.

3.1.1.3. Comparaison de la période holocène à D 10, Byrd, Dôme C et Vostok

Tout comme pour le sodium, nous avons calculé les flux de retombées d'acide sulfurique sur la période holocène, à partir de nos résultats sur les forages profonds de D10, Byrd, Dôme C et Vostok. Les concentrations moyennes et les flux correspondants obtenus sont indiqués dans le tableau 24.

Sites	$SO_4^{--\star}$ ex (ng.g ⁻¹)	a (g H ₂ O/an)	Φ (kg/km ² /an)
Dôme C	59,5	3,4	2,0
Vostok	60,0	2,2	1,3
D 10	28,0	20 - 30	5,6 - 8,4
Byrd	28,0	13	3,6

Tableau 24 : Evaluation du flux de retombées moyen d'acide sulfurique pour la période holocène.

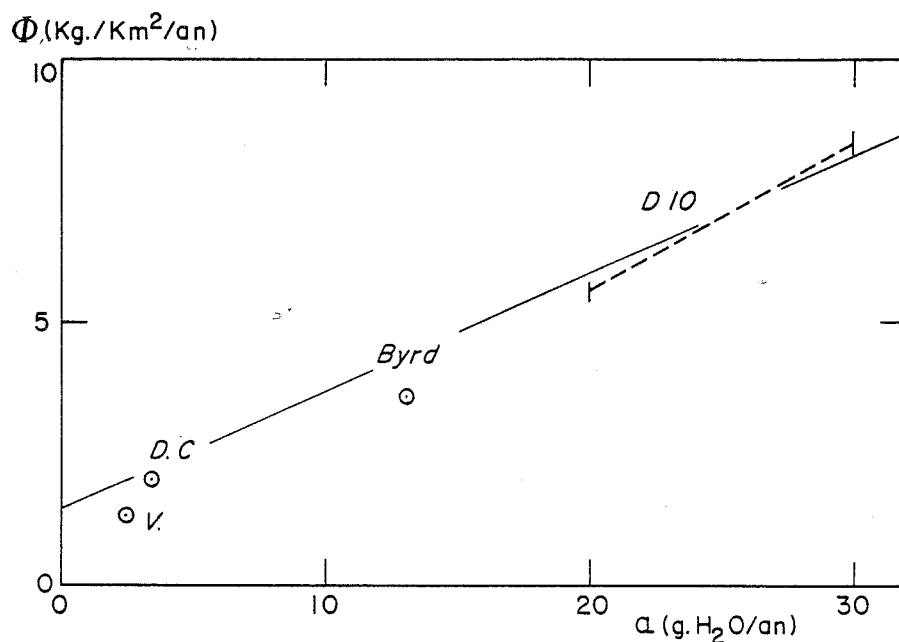


Figure 57 : Variations du flux de retombées moyen d'acide sulfurique en fonction du taux d'accumulation sur la période Holocène. Pour le cas de D 10 (segment en pointillé), nous avons calculé le flux pour des accumulations allant de 20 à 30 g H₂O/an (voir paragraphe 2.2.3). La droite en trait plein représente la relation flux-accumulation obtenue sur la période 1959-1969.

Contrairement à ce que nous avons observé pour le sodium, le flux de retombées moyen d'acide sulfurique non volcanique est comparable entre l'Antarctique de l'ouest (Byrd) et de l'est (Dôme C, Vostok et la Terre Adélie) (voir figure 57). Ceci semble indiquer que la teneur de l'aérosol atmosphérique en acide sulfurique est aussi homogène au-dessus de l'ensemble du continent antarctique. Ces résultats seront discutés en termes de source et de transport à la fin de ce paragraphe.

3.1.2. ETUDE DES VARIATIONS SAISONNIERES AU POLE SUD

La présence d'acide sulfurique dans la neige comme dans l'atmosphère antarctique, en quantité significative même en période d'activité volcanique restreinte, n'est pas encore complètement expliquée. L'étude des variations saisonnières peut fournir des indications sur l'origine de ce "bruit" d'acide sulfurique.

Nous avons déterminé la teneur en sulfate des couches de neige déposées au Pôle Sud entre 1949 et 1953 d'une part (figure 58), entre 1959 et 1969 d'autre part (figure 55), les années 1953 à 1959 n'ont pas été étudiées faute d'échantillons correspondant à cette période. Le signal saisonnier moyen (mode de calcul décrit précédemment au paragraphe 2.3.) pour les deux périodes de temps considérées montre que la teneur en sulfate de la neige est maximale en été (figure 45). Cependant, les deux profils obtenus ne représentent pas uniquement les variations des teneurs en acide sulfurique d'origine non volcanique. En effet, d'une part l'augmentation de la teneur en sel de mer observée dans les couches d'hiver (paragraphe 2.3.) entraîne une augmentation de la teneur en sulfate neutre, d'autre part, la période 1959-1969 inclut l'éruption de l'Agung (1963) et peut-être même d'autres plus modestes telles que le Fernandina (0°S, 1968) (Legrand et Delmas, 1984). De fait, comme le montre la figure 55, la teneur en sulfate de la neige au Pôle Sud augmente fortement à partir de 3,14 mètres de profondeur (janvier 1964), ce qui correspond très bien aux premières arrivées de débris volcaniques de l'Agung au-dessus du Pôle (décembre 1963 : Dyer and Hicks, 1965). Après être revenue à son niveau de base entre 1966 et 1967, la teneur en sulfate augmente de nouveau entre 1968 et 1969, mais plus faiblement.

Afin d'obtenir la variation saisonnière de la teneur en acide sulfurique purement de "bruit de fond", nous avons déterminé le signal saisonnier moyen correspondant à la quantité d'acide sulfurique uniquement sur les périodes (1949-1953) et (1960-1963).

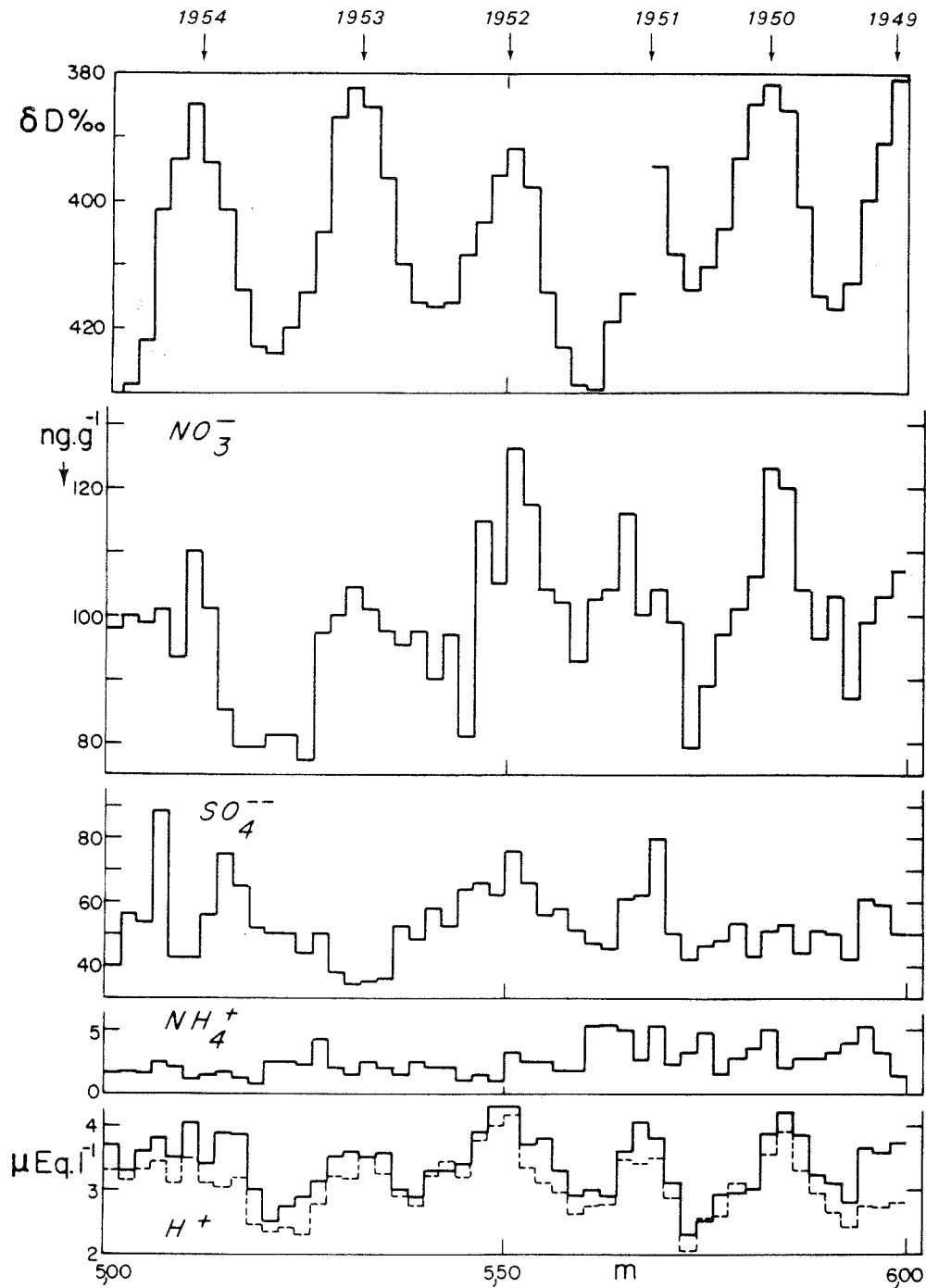


Figure 58 : Variations de NO_3^- , SO_4^{2-} et NH_4^+ pour la neige déposée au Pôle Sud entre 1949 et 1953, la courbe du haut (teneur en deutérium, δD , est de Jouzel et al. 1983). La courbe du bas représente, en traits pleins, l'acidité mesurée, la courbe en pointillé l'acidité calculée (voir chapitre 3).

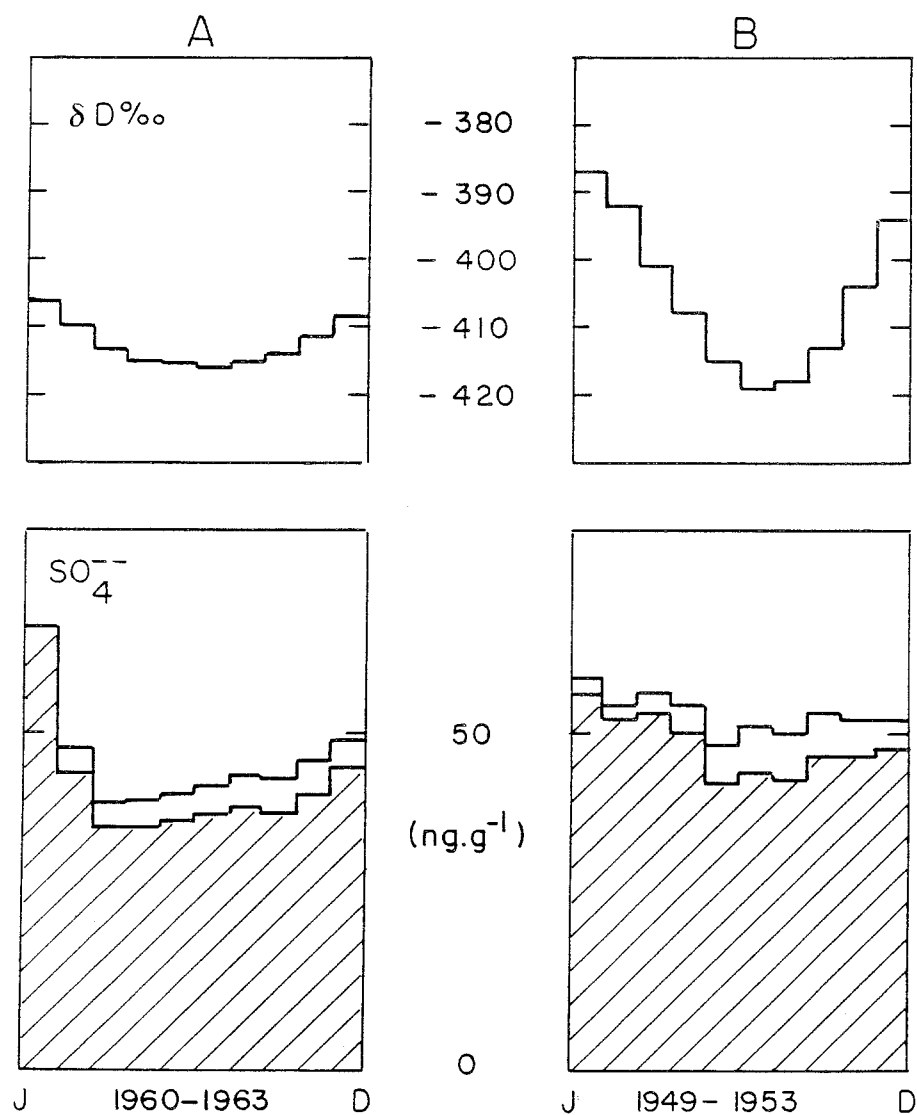


Figure 59 : Signaux saisonniers moyens obtenus au Pôle Sud sur la période 1960-1963 (A), 1949-1953 (B), pour la teneur en deutérium, en sulfate et en acide sulfurique (partie hachurée).

Les signaux saisonniers obtenus (figure 59) montrent que si l'acide sulfurique passe bien par un maximum en été, l'amplitude des variations été et hiver est limitée, comparée à celle obtenue précédemment (paragraphe 2.3.) pour le sel de mer. D'ailleurs, le rapport des teneurs été-hiver apparaît relativement faible aussi bien dans l'aérosol que dans la neige (tableau 25).

	Eté	Hiver	Rapport été/hiver
Aérosol (ng/m^3)	201	77	2,6
Neige { 1960-1963 (ng.g^{-1}) { 1949-1953	62 55	36 42	1,7 1,30

Tableau 25 : Comparaison des rapports de concentration en acide sulfurique entre été et hiver dans l'aérosol (Cunningham et Zoller, 1981) et dans la neige (ce travail) pour la station Pôle Sud.

Nous interpréterons ces variations saisonnières en termes de sources et de transport au paragraphe 3.1.4.

3.1.3. VARIATIONS SECUAIRES AU DOME C

L'homme rejette dans l'atmosphère et ce surtout depuis le début du siècle des quantités croissantes de composés soufrés, pour l'essentiel du dioxyde de soufre SO_2 . Estimées à 80 MT/an en 1943 (Kellog et al. 1972), puis à 130 MT/an dans les années 1970 (Friend, 1973), elles atteignent aujourd'hui près de 200 MT/an (Cullis et Hirshler, 1980). Weiss et al. (1975) ont mis en évidence une augmentation d'un facteur 2 de la concentration en sulfate de la neige au Groënland depuis le début de l'ère industrielle (1880). Il était donc intéressant d'étudier l'évolution de la teneur en acide sulfurique des neiges antarctiques pendant les mêmes périodes de temps.

Sur la figure N° 60, nous avons reporté les teneurs en acide sulfurique supposées être d'origine non volcanique, pour la neige déposée au Dôme C entre 1760 et 1972. Nous y avons également reporté la quantité de sulfate présente en excès par rapport au sel de mer, cette quantité étant plus généralement utilisée dans la littérature traitant du cycle du soufre. Rappelons que cette dernière quantité représente la teneur en acide sulfurique lorsque le rapport $\text{Cl/Na} > 1,8$. Par contre, lorsque $\text{Cl/Na} < 1,8$, l'excès de sulfate présent par rapport à l'eau de mer est composé non seulement d'acide sulfurique mais aussi de sulfate neutre (voir paragraphe 4.4, Chapitre 3).

Sur la figure 60, nous avons éliminé les échantillons correspondant aux neuf événements, répertoriés sur la figure 65, qui sont liés à des retombées d'origine volcanique comme nous le verrons plus loin au paragraphe 3.2. On trouve que la teneur en acide sulfurique passe de $0,7 \pm 0,18 \mu\text{Eq. l}^{-1}$ sur la période 1760-1880 (15,55 à 7,50 mètres de profondeur) à $1,23 \pm 0,26 \mu\text{Eq. l}^{-1}$ sur la période 1880-1970 (0,50 à 7,50 mètres de profondeur). Simultanément sur toute cette période, la teneur de sulfate en excès reste inchangée (voir figure 60) car l'augmentation d'acide sulfurique entre la période 1760-1880 et 1880-1970 est compensée par la diminution parallèle de la teneur en sulfate neutre comme en témoignent les valeurs des rapports Cl/Na (voir figure 47). Il ne faut cependant pas voir dans l'augmentation des teneurs en acide sulfurique une tendance liée à la source anthropogénique car, d'une part des variations du même type ont déjà eu lieu dans un passé plus lointain (voir figure 85, chapitre 5), d'autre part sur la période 1880-1970 aucune tendance avec le temps n'apparaît clairement comme cela avait d'ailleurs déjà été observé par Delmas et Boutron 1980. De plus, entre 1945 et 1972, les teneurs en acide sulfurique de la neige semblent diminuer alors que l'augmentation des émissions anthropogéniques s'accélère après 1965. Nos résultats suggèrent donc que l'Antarctique, contrairement au Groënland, n'est pas encore à l'heure actuelle concernée par la pollution soufrée. Ce résultat est en accord avec le fait que 90% des émissions de SO_2 dues à l'activité humaine ont lieu dans l'hémisphère Nord (Kellogg et al. 1972). Une quantité de 20 MT/an de SO_2 dans l'hémisphère Sud (10% des 200 MT émis annuellement à l'échelle du globe) demeure encore limitée, comparée aux sources naturelles telles que l'activité biogénique des océans (estimations globales les plus récentes 40 MT/an

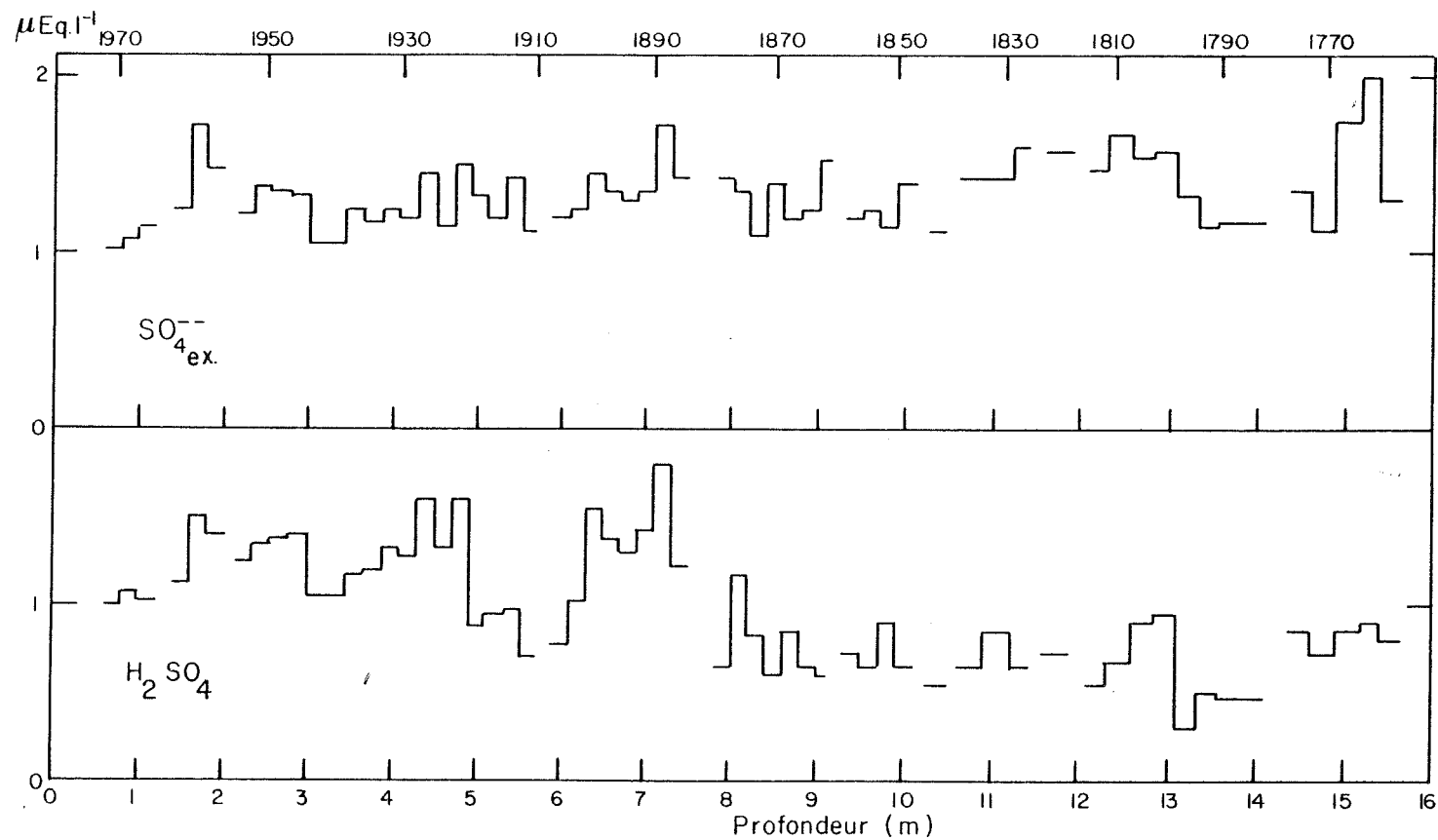


Figure 60 : Teneur en sulfate en excès et en acide sulfurique de la neige déposée au Dôme C entre 1760 et 1972.

(Ivanov et Freney, 1984) à 80 MT/an (Andrae et Raemdonck, 1983), soit 27 à 53 MT/an pour l'hémisphère Sud). De plus, le temps de résidence du dioxyde de soufre est beaucoup plus court en atmosphère polluée (2,8 jours : Hidy et al. 1978) que dans l'atmosphère océanique (10 jours : Calvet et al. 1978).

3.1.4. DISCUSSION

Nos résultats montrent que les couches de neige déposées en Antarctique contiennent des quantités significatives (30 à 50 ng.g⁻¹) d'acide sulfurique et ceci même en période non volcanique. L'étude des variations spatio-temporelles et des flux de retombées annuels a montré que ce "bruit de fond d'acide sulfurique" est homogène et semble indépendant de l'altitude, même dans les premiers kilomètres du bord du continent antarctique.

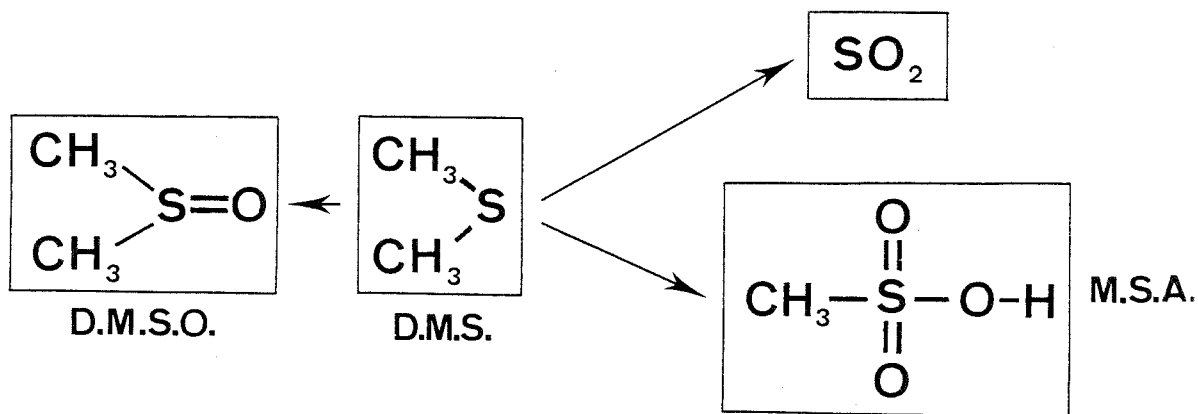
L'origine de ce "bruit résiduel" d'acide sulfurique a déjà fait l'objet de quelques études tant dans la neige que dans l'aérosol antarctique. Ces études avancent différentes sources possibles : la conversion gaz-particule des composés soufrés émis par l'activité biogénique à la surface des océans et des continents ou encore l'acide sulfurique présent dans la couche de Junge même en période d'activité volcanique très réduite (voir pour l'étude de la neige: Delmas et Boutron 1980, Aristarain et al. 1982, Delmas 1982; Herron 1982; Legrand et Delmas 1984; pour l'aérosol: Cunningham et Zoller 1981, Maenhaut et al. 1979, Shaw 1983). L'importance relative des différentes sources peut être estimée à partir des flux d'émissions de composés soufrés (tableau 26).

Le dioxyde de soufre (SO₂), précurseur gazeux de l'acide sulfurique, peut être émis directement dans l'atmosphère (volcans, activité humaine) ou généré dans l'atmosphère même par la photooxydation de composés soufrés réduits (H₂S, organosoufrés) naturels ou anthropogéniques. Les plus récentes estimations semblent montrer que l'activité biogénique marine est à l'origine de l'essentiel des émissions naturelles de composés soufrés dans l'atmosphère (tableau 26).

Source	Emission en MT/an de SO ₂ (globale)	Emission dans H.S.
Anthropogénique	196	20
Activité biogénique (continents)	32	11
Activité biogénique (océans)	40	27

Tableau 26 : Estimations des émissions des principales sources de composés soufrés dans la troposphère (d'après Ivanov et Freney, 1984).

Le principal composé soufré volatile de la couche superficielle de l'océan est le diméthyl sulfure (D.M.S.) (Andreae et Barnard, 1984 ; Nguyen et al, 1984). L'oxydation dans l'atmosphère de ce composé produit le diméthyl sulfoxyde (D.M.S.O.), l'acide méthane sulfonique (M.S.A.) et le SO₂ (voir ci-dessous).



Bien que les mécanismes et les cinétiques des différentes oxydations ne soient pas encore bien établis (Grosjean, 1984), il semble que la réaction prépondérante soit l'oxydation en dioxyde de soufre. L'oxydation ultérieure du SO₂ en acide sulfurique permet ainsi de rendre compte des excès de sulfate observés dans l'aérosol marin (Gravenhorst, 1978 ; Bonsang et al., 1980).

Dans une étude antérieure, Herron (1982) suggère que la source d'acide sulfurique en Antarctique et au Groënland est située dans la basse atmosphère, mais la faible décroissance des flux de retombées en fonction de l'altitude, base de cette hypothèse, n'est pas certaine du tout comme nous l'avons discuté précédemment (voir paragraphe 3.1.1.1.)

En opposant la faible décroissance des retombées de sulfate en excès avec l'altitude à celle au contraire très rapide de sodium, Herron 1982 suggère que l'océan n'est pas la source d'acide sulfurique en Antarctique. Nos résultats conduisent à la même observation, mais nous pensons que cela ne s'interprète pas nécessairement en termes de source. En effet, le sel de mer et l'aérosol sulfurique peuvent, du fait de leur mode de formation distinct (émission d'embruns marins et conversion gaz-particules), se comporter de manière très différente au niveau du transport et de la retombée. D'autre part, la couche de Junge dont l'alimentation en composés soufrés n'est pas encore clairement élucidée (petites éruptions volcaniques, diffusion du SO_2 présent dans la troposphère ou encore oxydation in situ de composés tels que COS), pourrait représenter une contribution importante pour la neige antarctique car le temps de résidence dépasse un an dans la stratosphère. Lazrus et Gandrud (1974) estiment que 0,2 MT de sulfate sont transférées annuellement de la stratosphère dans la troposphère. A partir de cette estimation, nous avons évalué la contribution des retombées annuelles d'acide sulfurique provenant de la couche de Junge dans la neige antarctique en nous étalonnant sur l'éruption du Mont Agung. L'éruption du Mont Agung a injecté près de 18 millions de tonnes de sulfate dans la stratosphère, dont 12 MT dans l'Hémisphère Sud, nous observons une retombée moyenne de 11,1 kg / km² de sulfate volcanique dans la neige du Pôle Sud (voir paragraphe 3.2.4.1.). En période non volcanique, la contribution de la stratosphère à la neige antarctique (Pôle Sud) peut ainsi être estimée grossièrement par une simple règle de trois (tableau N° 27).

L'autre source naturelle possible d'acide sulfurique pour l'Antarctique est l'activité biogénique des océans et des continents. En première approximation, il semble légitime concernant l'aérosol antarctique de ne prendre en considération que l'océan. En effet, l'Antarctique est d'abord une île, très éloignée des autres continents. L'émission de composés soufrés à la surface des continents (qui semble être 2 ou 3 fois plus faible que celle à la surface de l'océan, voir tableau 26) devrait, si l'on considère le court temps de résidence (quelques jours) de SO_2 dans la troposphère, avoir une contribution moins importante à l'aérosol antarctique que celle de la surface des océans. Nos résultats et ces considérations appuient l'hypothèse antérieurement formulée par d'autres auteurs (Delmas et al. 1982, Cunningham et Zoller 1981, Delmas 1982) d'une importante contribution de l'activité biogénique océanique à l'aérosol antarctique riche en sulfate. Afin de fixer les idées, remarquons que le flux de retombées moyen d'acide sulfurique en Antarctique est voisin, d'après nos résultats, de $5 \text{ kg/km}^2/\text{an}$, soit la moitié environ des retombées de l'Agung.

	Source (H.S.)	Retombées au Pôle Sud
Agung	12 MT	11,1 kg/km ² (2 ans)
Couche de Junge (période non volcanique)	0,1 MT/an (Lazrus et Grandrud 1974)	0,1 kg/km ² /an

Tableau 27 : Evaluation du flux de retombées annuel de sulfate dans la neige du Pôle Sud, provenant de la couche de Junge en période non volcanique.

L'étude des variations saisonnières au Pôle Sud vient conforter le calcul précédent. L'observation de teneurs en acide sulfurique maximales dans les couches de neige estivales au Pôle Sud est en bon accord avec le résultat d'autres études portant tant sur l'aérosol antarctique (Cunningham et Zoller 1981) que sur la précipitation en d'autres sites plus côtiers du continent (par exemple dans la péninsule antarctique : Aristarain et al. 1982).

Il se trouve que le court échange stratosphère-troposphère se produit en été en Antarctique (Décembre-Janvier), c'est-à-dire au moment même où l'effet photochimique est maximum. On ne peut donc pas distinguer à partir de l'observation d'un maximum d'été entre un apport stratosphérique et un mécanisme d'oxydation photochimique du SO_2 . L'interprétation des variations saisonnières avec maximum d'été est donc ambiguë. Cependant, si on suppose que les 0,2 MT d'acide sulfurique sont transférées en été depuis la couche de Junge jusque dans la troposphère, nous devrions observer dans la neige au Pôle Sud une retombée de $0,10 \text{ kg/km}^2/\text{an}$. Nos résultats montrent que la masse d'acide sulfurique supplémentaire déposée en été au Pôle Sud est en fait bien supérieure à cette valeur. En effet, par différence des flux de retombées entre l'été et l'hiver, nous observons respectivement $0,35 \text{ kg/km}^2/\text{an}$ pour la période 1959-1963 et $0,43 \text{ kg/km}^2/\text{an}$ pour la période 1949-1953. Notons d'ailleurs que ces deux valeurs représentent probablement des limites inférieures du fait d'un mélange partiel toujours possible des couches entre été et hiver. L'ensemble de nos résultats suggère donc que l'acide sulfurique déposé en Antarctique ne provient pas pour l'essentiel de la stratosphère, ceci en période d'activité volcanique peu importante bien sûr. Les variations saisonnières au Pôle Sud seraient donc dues à une photochimie plus active du dioxyde de soufre présent dans la troposphère durant la période estivale. Durant cette période, la circulation atmosphérique depuis les régions côtières vers le haut plateau antarctique est par contre plus faible comme le suggèrent les variations saisonnières de sodium observées au Pôle Sud (voir paragraphe 2.4.1.3.). La photochimie plus active combinée avec un plus faible transport de matière durant l'été vers les régions centrales peut expliquer que les variations saisonnières soient moins marquées au Pôle Sud qu'à l'Ile de James Ross.

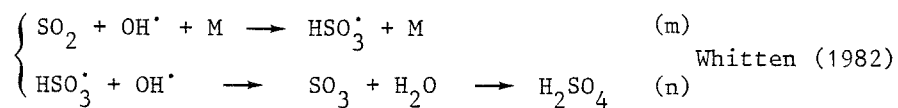
3.2. PALEOVOLCANISME DES DEUX CENTS DERNIERES ANNEES

3.2.1. INTRODUCTION

La composition chimique de l'atmosphère est fonction de la nature et de l'intensité des différentes sources d'aérosols. Parmi ces dernières, la source volcanique peut être importante à l'échelle régionale, en particulier pour les composés du soufre. Cependant, après certaines grandes éruptions volcaniques explosives, les perturbations ont un caractère global avec des répercussions possibles sur le climat de tout un hémisphère. En effet, de telles éruptions envoient non seulement dans la troposphère mais aussi jusque dans la stratosphère, des millions de tonnes de gaz (essentiellement du dioxyde de soufre SO_2 mais aussi de l'hydrogène sulfuré H_2S et des acides halogénés comme HCl et HF) et de cendres.

Les cendres retombent par gravité en quelques jours ou semaines mais les composés gazeux séjournent dans la stratosphère pendant des périodes de temps de l'ordre de une à deux années.

En quelques mois, les composés soufrés sont oxydés en acide sulfurique suivant une chaîne de réactions encore mal connues mais que l'on a coutume de schématiser par les réactions suivantes :



(où M est un métal et OH^\cdot est le radical hydroxyle).

L'acide sulfurique formé constitue une sorte de "voile" autour de la Terre (couche de Junge) responsable de l'effet climatique (en général un refroidissement troposphérique et un réchauffement stratosphérique).

Il n'est pas dans nos objectifs d'entrer dans le détail de la chimie stratosphérique, ni de l'effet climatique lié au volcanisme explosif. Le lecteur voudra bien se reporter aux ouvrages ou articles spécialisés (citons par exemple le livre de Whitten 1982 et les articles de Lamb 1970, Oliver 1976, Pollack et al. 1976, Hirschboeck 1979, Rampino et Self 1982, Devine et al. 1984).

Le nuage volcanique (et les études relatives aux éruptions récentes de l'Agung 1963, du Saint-Helens 1980 et du El Chichon 1982 l'ont bien prouvé) se répand en quelques mois sur l'ensemble de l'hémisphère et même sur l'ensemble du globe dans le cas des éruptions subtropicales. Les régions polaires sont donc contaminées par l'intermédiaire d'un transport stratosphérique de l'acide sulfurique. Comme les atmosphères polaires contiennent relativement peu d'impuretés, l'effet de telles perturbations volcaniques doit s'y faire sentir beaucoup plus nettement que partout ailleurs à la surface du globe. On trouvera une discussion plus développée de ces phénomènes dans l'article (soumis pour publication au Journal of Geophysical Research) de R. Delmas, M. Legrand, A. Aristarain et F. Zanolini intitulé "Volcanic deposits in Antarctic snow and ice".

Notre objectif était d'une part de pouvoir retracer à partir de nos mesures chimiques dans les neige et glace antarctiques, une histoire du volcanisme explosif sur les 200 dernières années, d'autre part, d'aborder certains aspects concernant la répartition interhémisphérique des retombées de débris volcaniques et les mécanismes physiques de retombée dans les régions polaires.

Pour prouver la validité de nos résultats, en quelque sorte pour les étalonner, nous disposons des catalogues publiés des grandes éruptions historiques des derniers siècles (Lamb 1970, Newhall et Self 1982). Deux échelles sont généralement utilisées dans la littérature pour caractériser la magnitude estimée d'une éruption : le d. v. i. (dust veil index) et le V. E. I. (Volcanic Explosivity Index). Lamb (1970) a le premier répertorié les éruptions volcaniques (depuis 1500) en leur affectant un indice (le d.v.i.) basé soit sur les mesures de transmission optique de l'atmosphère (mesures effectuées depuis 1883),

soit sur les anomalies de température observées après 1750 et les estimations de poussières émises. Un autre indice, le V.E.I. lié au caractère explosif de l'éruption, est lui, évalué à partir des caractéristiques propres de l'éruption (intensité, amplitude des effets locaux et puissance libérée (Newhall et Self 1982)). Donc, même si les valeurs de ces deux indices apparaissent parfois étroitement liées, rappelons cependant que le d.v.i. reste d'abord un indice établi à partir d'observations atmosphériques alors que le V.E.I. est un indice attribué sur la base de considérations essentiellement volcanologiques.

La recherche du paléovolcanisme dans les glaces polaires est actuellement un des seuls moyens susceptibles de donner des informations quantitatives sur les émissions de composés soufrés dans l'atmosphère ayant suivi les grosses éruptions volcaniques du passé. Les résultats obtenus à partir des carottes de glace seront donc des données très importantes pour les études concernant la relation "volcanisme et climat". De telles recherches avaient été faites récemment au Groenland. Il restait à en réaliser de semblables en Antarctique.

3.2.2. LES METHODES DE DETECTION

Jusqu'ici, les couches de neige ou de glace "riches en acide sulfurique" ont été localisées et évaluées quantitativement par quatre méthodes différentes.

3.2.2.1. LA CONDUCTIVITE STATIQUE OU CONDUCTIVITE "SOLIDE"

La conductivité solide est une méthode physique indirecte permettant de détecter dans une carotte les couches riches en protons (couches acides). Cette méthode consiste à suivre les variations du courant électrique collecté entre deux électrodes, portées à des potentiels différents, que l'on déplace le long de la surface d'une carotte de névé ou de glace. Hammer (1980) a montré que l'intensité i (en μA) du courant collecté était fonction de la teneur en proton suivant la relation $[H^+]$ (en $\mu Eq.l^{-1}$) = $0,045 i^{1,73}$. Il a ainsi pu mettre en évidence un certain nombre d'événements volcaniques dans la glace du Groenland.

Plus récemment, Zanolini (1982) a montré le rôle important joué par la nature de l'acide présent dans la précipitation (en particulier l'acide nitrique semble être beaucoup plus efficace que l'acide sulfurique sur le mécanisme de conduction de la glace); cet auteur suggère par ailleurs l'intervention d'autres paramètres liés à la structure propre de la glace.

Cette méthode, qui est facile à mettre en oeuvre sur le terrain et qui, de plus, a l'avantage d'être non destructive, semble tout à fait satisfaisante pour détecter les grosses éruptions volcaniques ($[H^+] > 5 \mu Eq.l^{-1}$). Par contre, dans le cas d'éruptions moins importantes, elle semble insuffisante à elle seule et nécessite des analyses chimiques complémentaires.

3.2.2.2. LA CONDUCTIVITE LIQUIDE

La conductivité liquide de l'eau de fusion d'un échantillon est proportionnelle à la concentration de tous les ions présents. Cependant, le proton, étant à la fois l'ion le plus mobile (sept fois plus en moyenne que les autres ions fréquemment présents comme Na^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{--}) et en général le plus important en concentration (voir paragraphe 4.2., chapitre 3), la simple mesure de ce paramètre chimique permet de détecter dans la neige les retombées acides d'origine volcanique (Hammer 1977, Legrand 1980). Cette méthode qui n'a pas, comme la précédente, l'inconvénient de dépendre de la nature de l'acide présent, n'en reste pas moins une mesure indirecte. Elle pourra être fortement dépendante des teneurs de la glace en sel de mer en régions côtières (Aristarain, 1980) ou même en d'autres composés tels que Na_2SO_4 ou $CaSO_4$ (composés présents en quantités significatives dans la précipitation des régions centrales de l'antarctique il y a 18000 ans, comme nous l'avons montré au paragraphe 5.4., chapitre 3).

3.2.2.3. LA TENEUR EN SULFATE

Les mesures de sulfate dans la neige du Dôme C ont permis de mettre en évidence une augmentation significative des teneurs dans les couches correspondant aux années qui ont suivi les éruptions du Mt Agung (1963) et du Krakatoa (1883) (Delmas et Boutron, 1980).

La détermination de la forme chimique des ions sulfate dans la neige a montré (paragraphe 4.4. et 5.4., chapitre 3) que la présence du sulfate n'était pas toujours due à la seule présence d'acide sulfurique, la neige pouvant parfois aussi contenir, et cela dans des proportions importantes, des composés chimiques comme le sulfate de sodium (Na_2SO_4) d'origine marine ou des sulfates de calcium et de magnésium (CaSO_4 et MgSO_4) d'origine terrigène. Il faut donc être prudent dans l'interprétation des données de sulfate.

3.2.2.4. MESURE DE L'ACIDITE

La mesure directe de la teneur en proton a permis (comme la mesure du sulfate) de mettre en évidence les éruptions du Mont Agung (1963) et du Krakatoa (1883) au Dôme C (Legrand, 1980; Delmas et al., soumis au Journal of Geophysical Research).

Cependant, comme nous l'avons montré au chapitre précédent, la neige des régions centrales de l'Antarctique contient non seulement de l'acide sulfurique, mais aussi des acides chlorhydrique et nitrique dans des proportions parfois importantes et variables au cours du temps. L'interprétation des mesures d'acidité n'est donc pas non plus univoque.

3.2.2.5. NECESSITE DU BILAN IONIQUE

Au cours de notre étude des couches de neige déposée au Dôme C, nous avons mis en évidence deux exemples qui illustrent bien les problèmes exposés ci-dessus. Par exemple, la mesure d'acidité effectuée sur les premiers mètres de névé fait apparaître deux pics (l'un à 7,20 mètres, l'autre à 6,00 mètres de profondeur) alors que les profils de concentration en sulfate ne présentent aucune tendance nette. Dans le premier cas (7,20 mètres), l'étude du bilan ionique a montré que l'augmentation de l'acidité était en fait due à une arrivée d'acide chlorhydrique (voir figure 61). Le deuxième cas est plus complexe; l'étude complète de la partie soluble des impuretés montre que la contribution de l'acide sulfurique à la teneur en sulfate est importante entre 5,80 et 6,00 mètres de profondeur, le sulfate de sodium étant présent en quantité négligeable; à l'inverse, avant et après cet intervalle de temps, le sulfate de sodium est prépondérant (associé à des rapports Cl/Na voisins de 1). Les variations des teneurs en H_2SO_4 et Na_2SO_4 se compensant; la teneur en sulfate reste

globalement inchangée bien qu'il ait eu des teneurs relativement élevées de H_2SO_4 entre 5,80 mètres et 6,00 mètres de profondeur.

L'étude globale de la partie soluble des impuretés présente par rapport aux quatre autres méthodes l'avantage de permettre la détermination des quantités effectives d'acide sulfurique présentes dans la précipitation. Par contre, cette méthode est beaucoup plus longue que les précédentes à mettre en oeuvre et ne peut guère être effectuée sur le terrain.

3.2.3. RECHERCHE DU PALEOVOLCANISME SUR LES 200 DERNIERES ANNEES

Nous verrons au paragraphe suivant que les sites du plateau antarctique (Dôme C, Pôle Sud et Vostok) constituent des sites privilégiés pour la recherche des débris volcaniques contenus dans la neige ou la glace. Mais, à l'exception du Pôle Sud, où l'accumulation de neige est relativement importante, la datation des couches dans ces régions est rendue difficile entre autres par la faiblesse des taux d'accumulation. Nous examinerons tout d'abord cette question de la datation des profils réalisés.

3.2.3.1. DATATION DES COUCHES DE NEIGE AU DOME C (0 à 15 m)

L'identification des deux horizons repères radioactifs (1955 et 1965, voir chapitre 2) permet d'obtenir l'accumulation moyenne annuelle sur la période des vingt cinq dernières années. L'oblitération des signaux isotopiques saisonniers (teneur en Tritium et Deutérium de la précipitation) dans la neige du Dôme C ne permet pas de dater les couches de neige déposée avant 1955 (Petit et al., 1982). De même, l'étude stratigraphique des couches de neige n'est pas aisée. Néanmoins, Petit et al. (1982) avancent par cette méthode une valeur moyenne de l'accumulation annuelle de $3,7 \pm 0,7$ gramme d'eau par an, sur les cent dernières années. L'interprétation détaillée du profil stratigraphique est donnée sur la figure 62 (Jean-Robert Petit, communication personnelle).

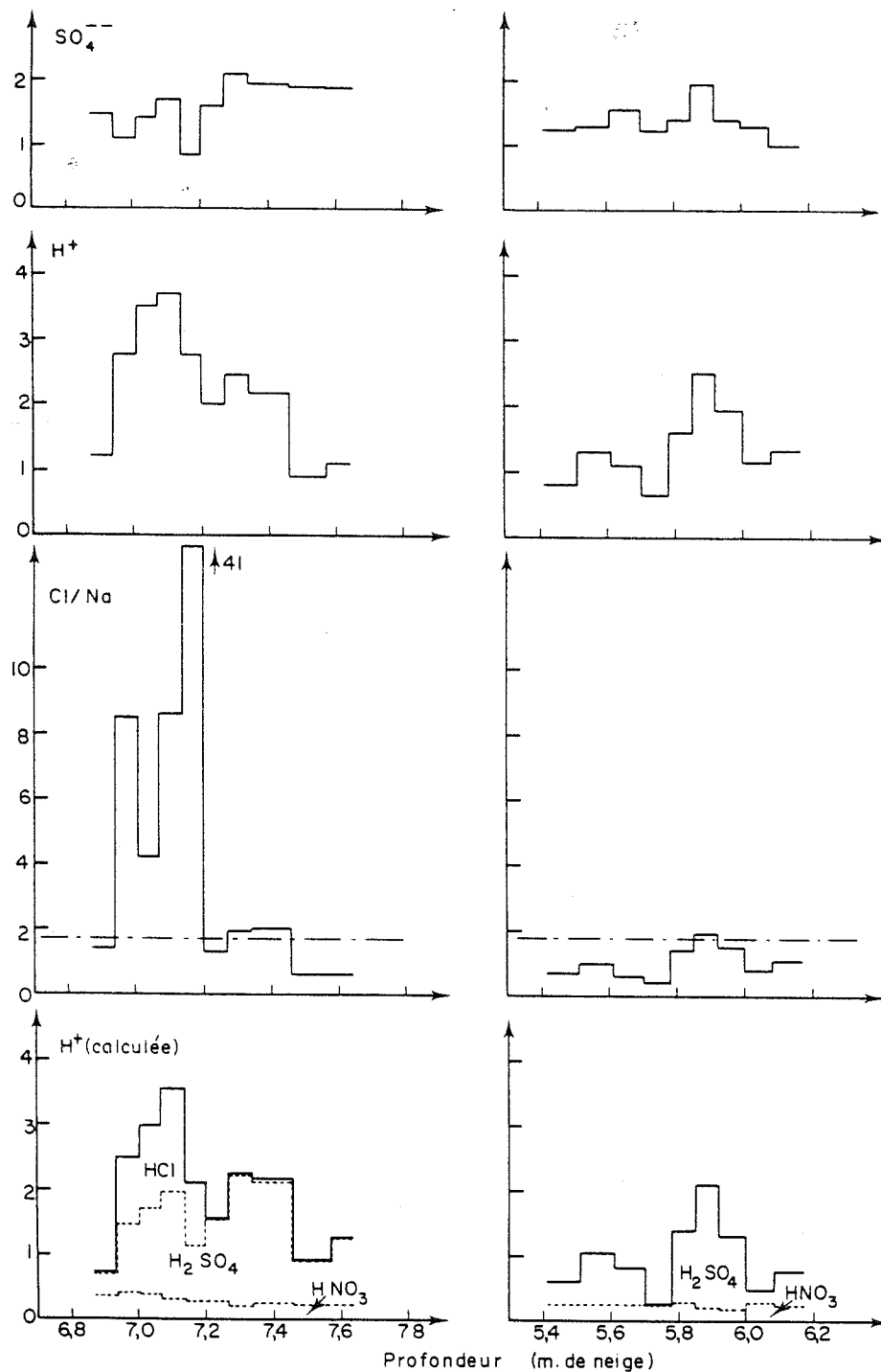


Figure 61 : Deux exemples d'identification difficile de la teneur en acide sulfurique de la neige (Dôme C) à partir des seuls profils de sulfate et d'acidité.

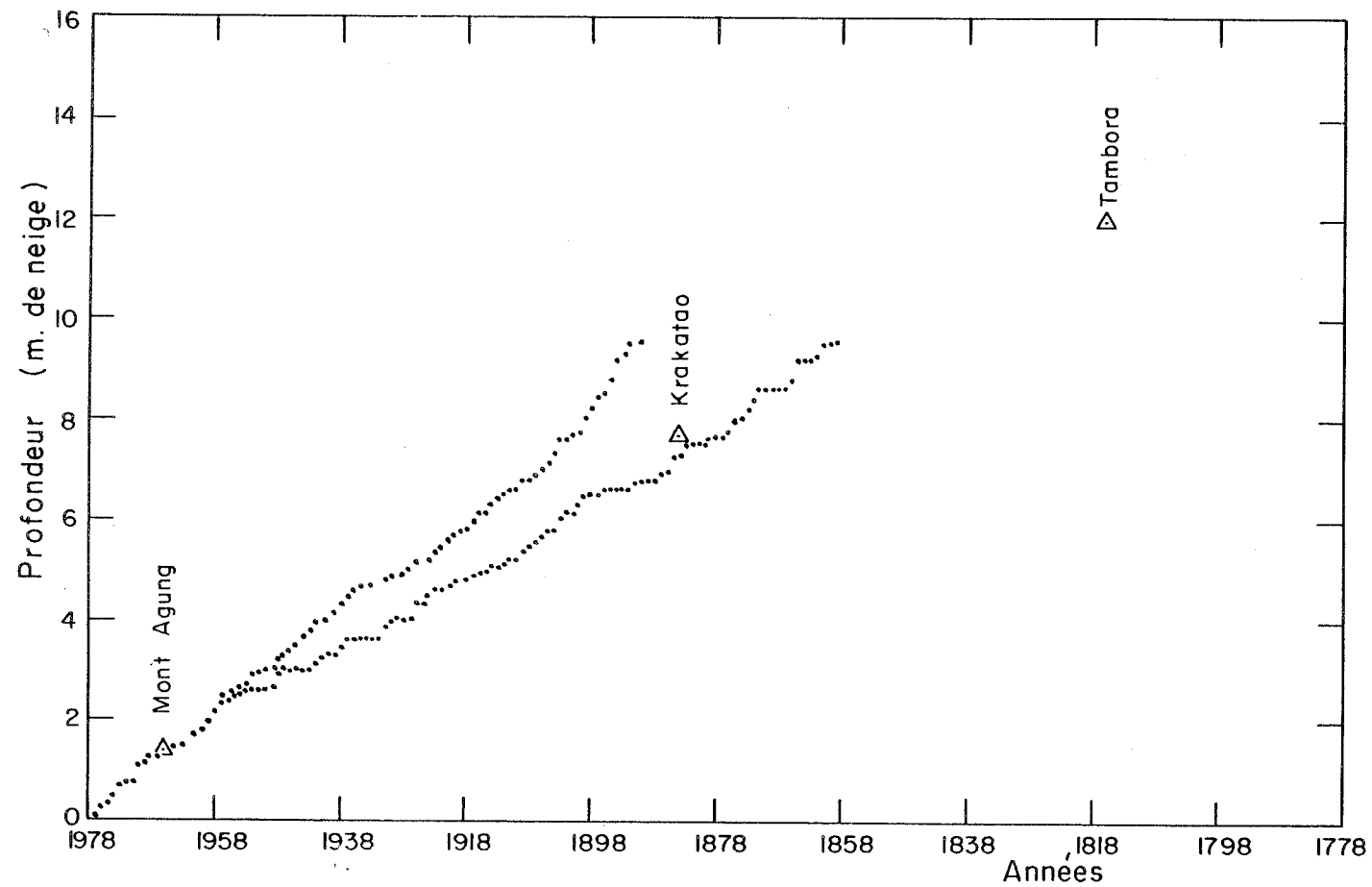


Figure 62 : Deux interprétations extrêmes du profil stratigraphique (entre 0 et 10 m de profondeur au Dôme C)
 (Jean-Robert Petit, communication personnelle) sur lesquelles sont reportés les niveaux Agung,
 Krakatoa et Tambora.

Le profil des concentrations en acide sulfurique des dix premiers mètres de neige, comme nous le verrons plus loin, fait apparaître deux événements très importants (pic n° 1 et pic n° 4, figure 65) que nous interpréterons comme étant liés aux retombées d'acide sulfurique qui ont suivi l'éruption du Mont Agung (1963) et du Krakatoa (1883). Ces deux horizons volcaniques confirment très bien l'interprétation stratigraphique correspondant au taux d'accumulation le plus faible (3,2 g d'eau par an, voir figure 62).

Des considérations volcanologiques (tableaux 28 et 29) indiquent clairement que le plus important événement volcanique des deux cents dernières années est le Tambora (1815). Si on utilise un taux d'accumulation constant de 3,2 g d'H₂O par an, le calcul permet de situer la profondeur à laquelle les traces de cet important événement devraient être visibles au Dôme C (à 5,18 m (profondeur en eau), soit 12 m (profondeur en neige)). La présence du plus important pic d'acide sulfurique de notre profil (0 à 15,6 m de neige) à 12,00 m de profondeur suggère très fortement qu'il s'agit effectivement des retombées de l'éruption du Tambora. Cette hypothèse sera d'ailleurs largement confirmée par l'étude de profils de conductivité "solide" réalisés au Pôle Sud, site pour lequel la datation des couches de neige est bien établie.

Pour tous les calculs qui vont suivre, nous avons donc "calé" la datation par rapport à cet événement. Notons que la valeur du taux d'accumulation ainsi obtenue (3,15 g H₂O/an) semble remarquablement stable au cours du temps, puisque la valeur obtenue pour les vingt cinq dernières années (mesure de la radio-activité globale β , Petit et al. 1982) est de 3,2 g H₂O/an.

3.2.3.2. EVENEMENTS VOLCANIQUES ENREGISTRES DANS LA NEIGE DU DOME C

3.2.3.2.1. Teneur en acide sulfurique des couches de neige

L'étude des ions majeurs (Na⁺, NH₄⁺, K⁺, H⁺, Cl⁻, NO₃⁻ et SO₄⁻⁻) a été effectuée entre 0,60 et 15,66 m de profondeur (profondeur en mètres de neige par rapport à la surface 1978) dans le but, moyennant une balance cations-anions équilibrée, d'évaluer les teneurs en acide sulfurique. Cependant,

les échantillons couvrant ces profondeurs n'ont pas été prélevés ni conditionnés de la même manière :

- Entre 0,60 et 2,60 m, les échantillons proviennent d'un puits (puits n° 2, voir paragraphe 2.1.chapitre 2) (figure 40).
- De 2,60 à 9,96 m, les échantillons considérés ici proviennent d'une carotte redécoupée à la scie téflonnée; nous avons choisi cette série plutôt que la série obtenue par recarottage (voir chapitre 2) car, pour cette dernière, le pas d'échantillonnage, trop irrégulier (5 à 30 cm), n'est pas bien adapté à la recherche d'évènements couvrant un ou deux ans (20 cm environ) (figures 13 et 14, chapitre 1).
- De 9,96 à 13,77 m, les échantillons sont obtenus par recarottage de demi-carottes (figure 63).
- De 13,77 à 15,66 m, en revanche, le recarottage a été effectué sur une carotte entière (figure 63).

La demi-carotte "11,48-12,24 m" nous a posé un problème; en effet, le haut de celle-ci était en très mauvais état (traces très importantes de fusion) et nous obtenons sur l'échantillon situé en haut de la carotte (11,48 à 11,58 m) une valeur très élevée ($1 \mu\text{Eq.l}^{-1}$) de NH_4^+ (ce qui est systématique en cas de fusion accidentelle, comme nous l'avons souligné au paragraphe 4.2., chapitre 1). Mais nous mesurons aussi dans cet échantillon $7,1 \mu\text{Eq.l}^{-1}$ de SO_4^{--} . Cette forte valeur est-elle due à de la contamination ou à une éruption volcanique ? Pour lever partiellement l'ambiguïté, nous disposons du chiffre de l'acidité ($6,2 \mu\text{Eq.l}^{-1}$ de H^+). Or, nous avons toujours observé dans le cas d'échantillons contaminés des acidités très faibles voire même souvent négatives (c'est-à-dire alcalins), (à titre d'exemple, la figure 16 (chapitre 1) montre que les échantillons correspondant à la partie externe contaminée ont un caractère basique). Afin de confirmer l'existence de ce niveau volcanique, nous avons effectué des mesures sur une carotte (entière) provenant du forage 905 m (voisin de quelques mètres du précédent) entre 10,00 et 11,58 m (au-dessous de 11,58 m, la carotte de ce forage n'était plus disponible).

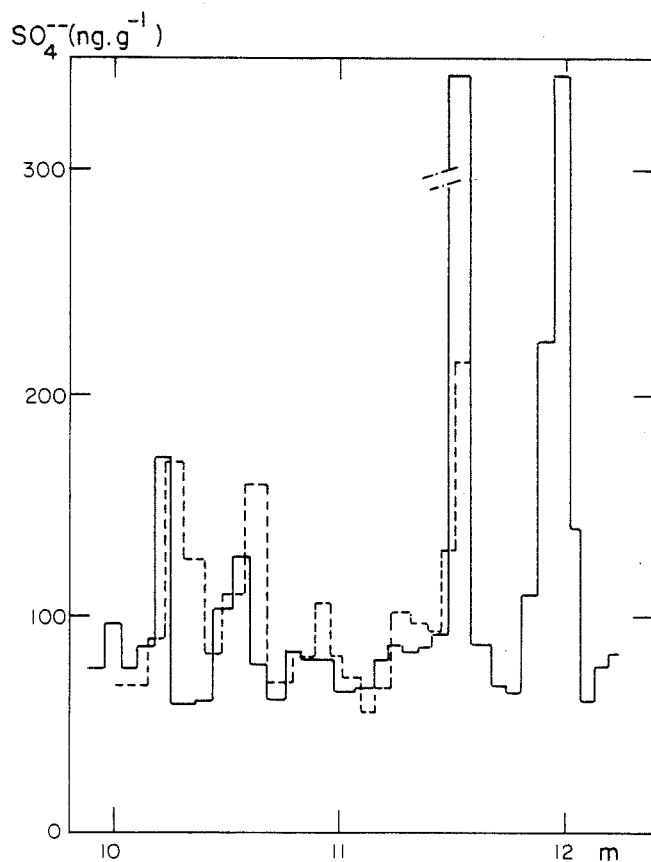


Figure 64 : Comparaison des teneurs en sulfate obtenues à partir de demi-carottes en mauvais état (courbe en trait plein) et de carottes entières (courbe en pointillé) au Dôme C.

La figure 64 montre un excellent accord entre les deux profils, en particulier pour les deux petits pics situés respectivement à 10,22 et 10,55 m de profondeur et confirme bien la présence du pic à 11,58 m.

Sur l'ensemble du profil, la balance entre les cations et les anions est bien équilibrée (voir figure 22, chapitre 3).

Rappelons que la teneur en acide sulfurique s'évalue de la manière suivante :

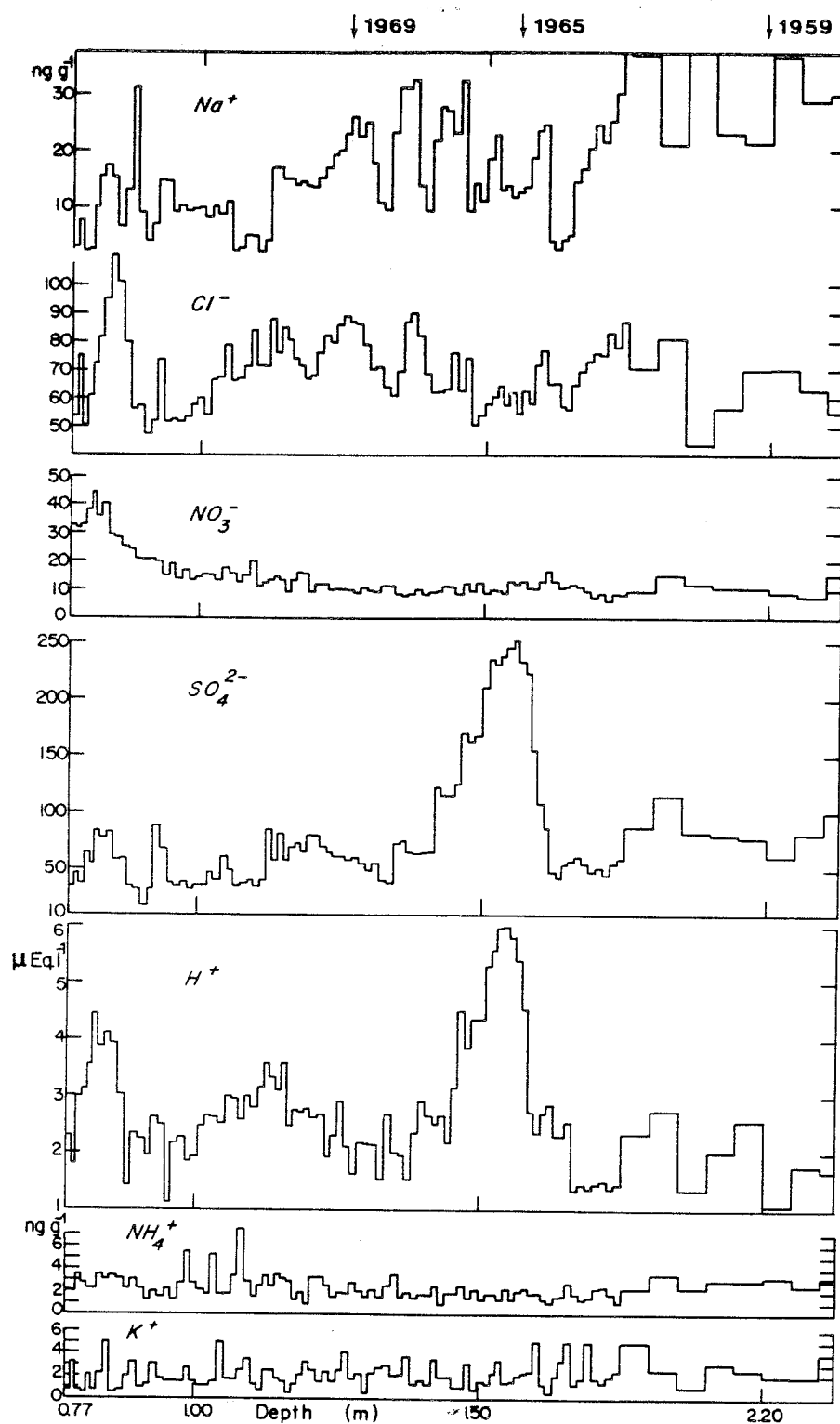


Figure 40 : Variations des teneurs en ions majeurs entre 0,77 et 2,40 mètres de profondeur au Dôme C.

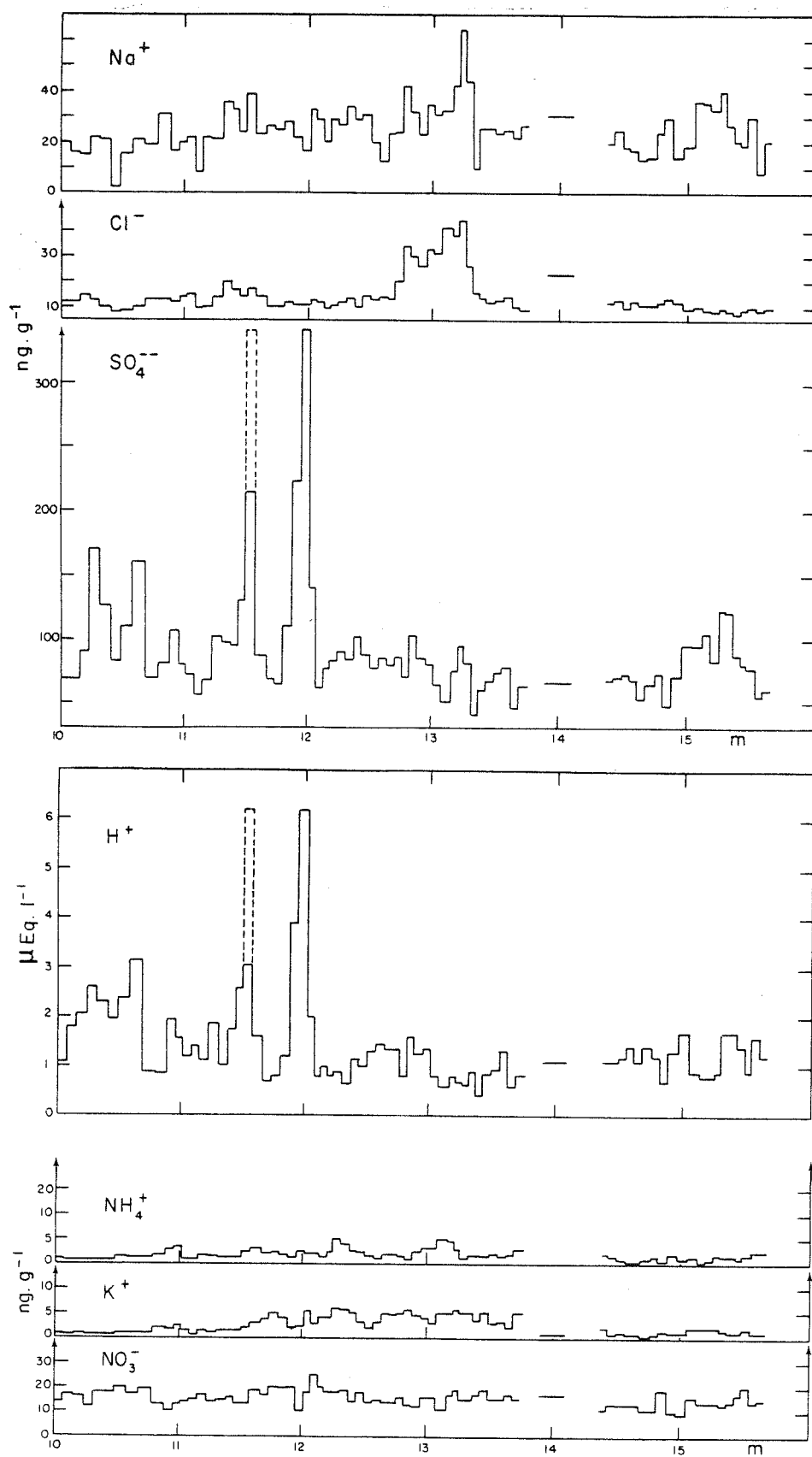


Figure 63 : Variations des teneurs en ions majeurs entre 10,00 et 15,66 mètres de profondeur au Dôme C.

$$\text{si } \text{Cl}/\text{Na} > 1,8 \quad [\text{SO}_4^{--}]_{\text{ex.}} = [\text{SO}_4^{--}]^{\star} - 0,121 [\text{Na}^+] \quad (1)$$

$$\text{si } \text{Cl}/\text{Na} < 1,8 \quad [\text{SO}_4^{--}]_{\text{ex.}} = [\text{SO}_4^{--}]^{\star} + [\text{Cl}^-] - 1,29 [\text{Na}^+] \quad (15)$$

Par ailleurs, l'acidité étant due à la présence des acides minéraux H_2SO_4 , HNO_3 et parfois HCl , l'excès de sulfate acide peut aussi être évalué indépendamment des relations (1) et (15) par :

$$\text{si } \text{Cl}/\text{Na} > 1,8 \quad [\text{SO}_4^{--}]_{\text{ex.}}^{\star} = [\text{H}^+] - [\text{NO}_3^-] - [\text{Cl}^-]_{\text{ex.}} \quad (27)$$

$$\text{si } \text{Cl}/\text{Na} < 1,8 \quad [\text{SO}_4^{--}]_{\text{ex.}}^{\star} = [\text{H}^+] - [\text{NO}_3^-] \quad (28)$$

Pour les 260 échantillons couvrant le profil 0,60 à 15,66 m de profondeur, nous avons évalué l'acide sulfurique par les deux méthodes (tableau A2.28, Annexe 2). L'écart entre les deux valeurs obtenues est lié au faible déséquilibre de la balance cation-anions.

3.2.3.2.2. Identification des évènements enregistrés dans la neige

La courbe des teneurs en acide sulfurique ainsi obtenue (figure 65) fait apparaître neuf évènements plus ou moins prononcés. Quatre d'entre eux se distinguent par leur importance : les pics n° 1, 8 et 9 par leur hauteur, le pic n° 4 surtout par sa largeur.

A partir de la profondeur P_{neige} , en mètres de neige, convertie en profondeur d'eau, $P_{\text{H}_2\text{O}}$, par l'équation $P_{\text{H}_2\text{O}} = P_{\text{neige}} \times \rho_c$ (ρ_c étant la densité cumulée à la profondeur P_{neige} , voir figure 66); nous avons déterminé les âges respectifs de ces différents évènements en supposant le taux d'accumulation annuel constant et égal à 3,15 g d' H_2O /an (paragraphe 3.2.3.1.). A partir des dates obtenues, nous avons tenté d'identifier chacun de ces évènements (tableau 30).

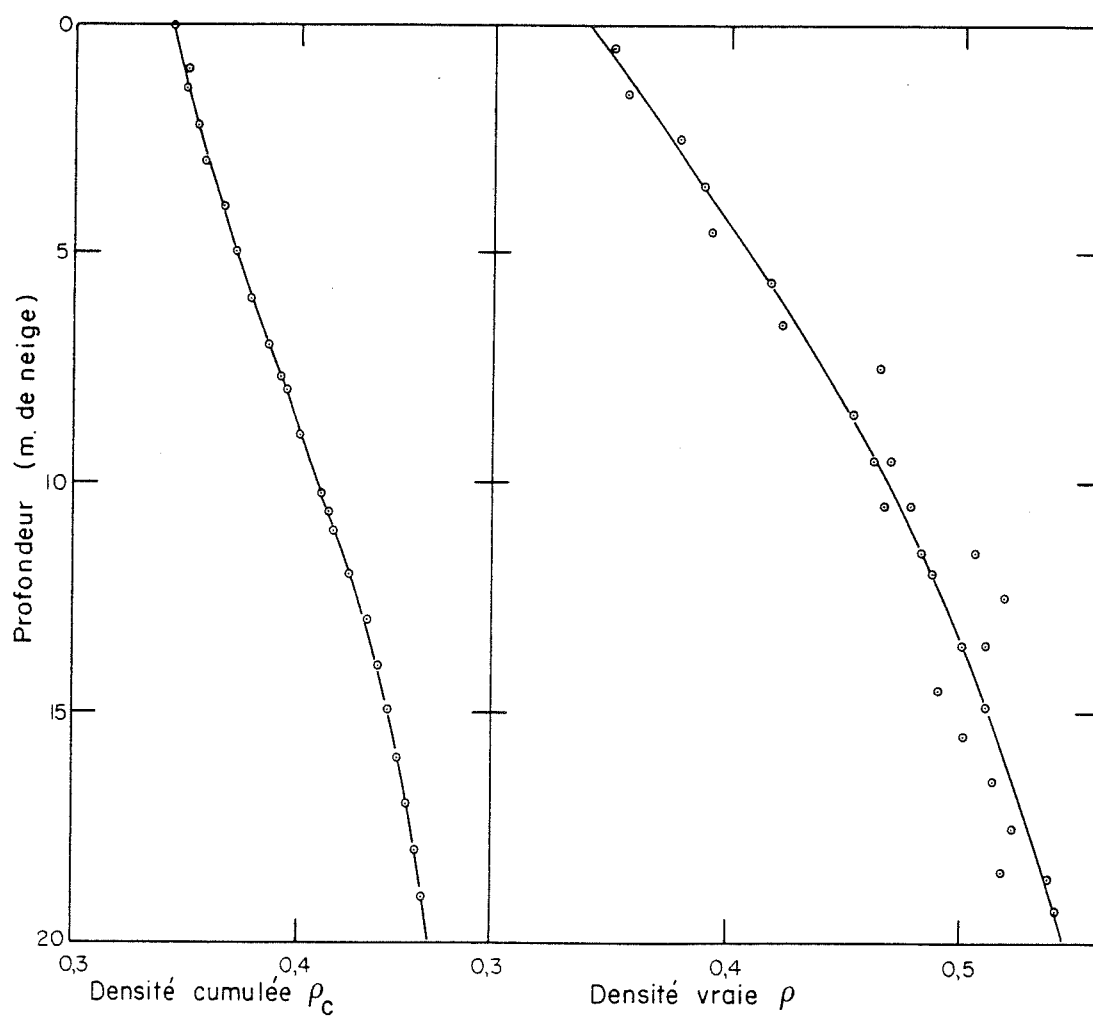


Figure 66 : Densité ρ et densité cumulée ρ_c au Dôme C pour la neige de surface (Michel Pourchet, communication personnelle).

La figure 65 montre immédiatement qu'il sera difficile de mettre en relation les éruptions volcaniques dont le V.E.I. est égal ou supérieur à 4 avec des événements observés dans la neige; en effet, près d'une trentaine d'éruptions de V.E.I. égal à 4 se sont produites durant la période que nous étudions et peu d'entre elles semblent enregistrées dans la neige à l'exception de celle de l'Agung, cette dernière semblant au contraire avoir entraîné une très importante perturbation de la teneur en acide sulfurique de la neige.

Par contre, en première lecture, la figure 65 suggère que toutes les éruptions dont le d.v.i. est supérieur à 400 semblent correspondre aux accidents que nous avons mis en évidence dans la neige, seul le pic n° 2 qui est d'ailleurs le plus faible de notre inventaire ne correspond pas à une éruption considérée dans l'échelle d.v.i.. L'excellente coïncidence dans le temps d'une part, la bonne correspondance existante entre l'importance du pic et l'importance de l'éruption considérée dans l'échelle d.v.i. (voir tableau 30) suggèrent fortement que nous avons bien repéré dans la neige les éruptions du Mont Agung (1963 : pic n° 1), du Santa Maria (1902 : pic n° 3), du Krakatoa-Tarawera (1883-86 : pic n° 4), de l'Armagura (1846, pic n° 6).

Pour le pic n° 5, il est difficile de trancher entre l'éruption du Makjan (1860) et du Cotopaxi (1857).

Pour le pic n° 2, qui n'apparaît pas de manière significative dans l'échelle d.v.i., nous proposons l'éruption du Nilahue (1955) car cette éruption s'est produite à haute latitude (40°S) et peut avoir été suivie de retombées d'acide plus importantes que ne le laisse supposer son V.E.I. de 4.

Si l'on considère que le d.v.i. affecté par Lamb à l'éruption du Coseguina (d.v.i. = 4000) est surestimé comme l'ont suggéré récemment Self et al., 1981, le pic n° 7 peut être attribué à cette éruption.

Enfin, le pic n° 8 correspondant à l'année 1824 a été attribué à l'éruption du Galunggung (1822) mais le d.v.i. proposé par Lamb pour cette éruption n'est pas en accord avec l'importance des retombées d'acide que nous observons dans la neige. L'ambiguïté de ce pic sera rediscutée plus loin.

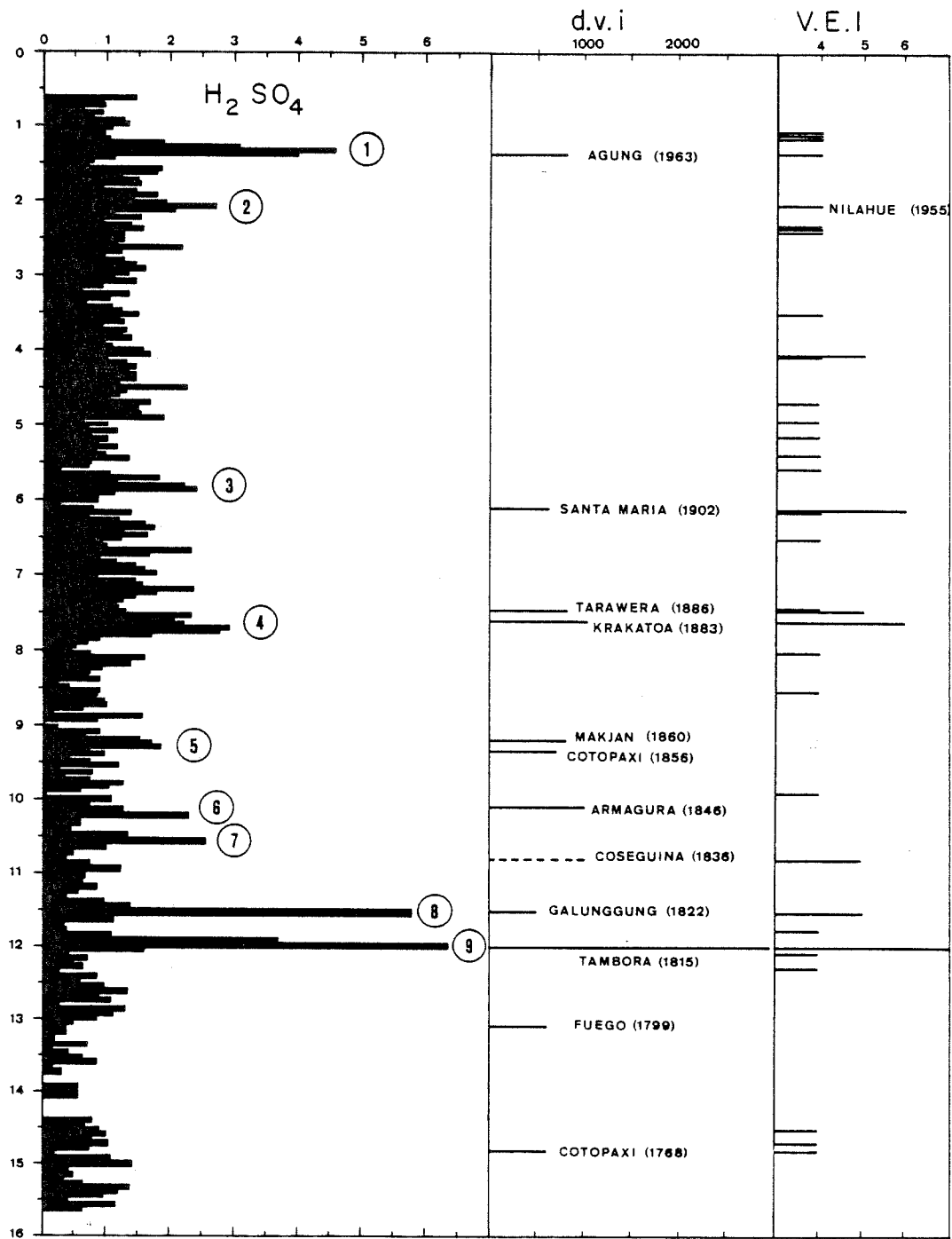


Figure 65 : Evolution de la teneur en acide sulfurique de la neige du Dôme C, comparaison avec les éruptions volcaniques au sud du 20°N (V.E.I. ≥ 4 ou d.v.i. > 400).

Evènement	Latitude	Année	V.E.I.	Evènement	Latitude	Année	V.E.I.
Jorullo	19°N	1759	4	Taal	14°N	1911	4
Peteroa	35°S	1762	4	Colima	19°N	1913	4
Jorullo	19°N	1764	4	Agrigan	19°N	1917	4
Cotopaxi	0,6°S	1768	4	Manam	4°S	1919	4
Papandayan	7°S	1772	4	Puyehue	40°S	1921	4
San Martin	19°N	1793	4	Fuego	14°N	1932	4
Soufrière (St Vincent)	13°N	1812	4	Quizapu	36°S	1932	5
Mayon	13°N	1814	4	Rabaul	4°S	1937	4
Tambora	8°S	1815	7	Lamington	9°S	1051	4
Colima	19°N	1818	4	Ambryn	16°S	1951	4
Galunggung	7°S	1822	5	Bagana	6°S	1952	4
Coseguina	13°N	1835	5	Nilahue	40°S	1955	4
Purace	2°N	1849	4	Agung	8°S	1963	4
Purace	2°N	1869	4	Taal	14°S	1965	4
Cotopaxi	0,6°S	1877	4	Kelut	8°S	1966	4
Krakatoa	6°S	1883	6	Oldoinyo Lengai	3°S	1966	4
Tungurahua	1°S	1886	4	Awu	4°S	1966	4
Tarawera	38°S	1886	5	Fernandina	0°S	1968	4
Dona Juana	1°N	1899	4	Fuego	14°N	1974	4
Soufrière (Montagne Pelée)	15°N	1902	4				
Santa Maria	15°N	1902	6				

Tableau 28 : Eruptions volcaniques survenues, dans l'hémisphère Sud et dans la zone équatoriale Nord (0 à 20°N), entre 1759 et 1978, dont le V.E.I. est supérieur ou égal à 4, d'après Newhall et Self, 1982.

Evènement	Latitude	Année	d.v.i
Mayon Luzon	14° N	1766	2300
Cotopaxi	0,6° S	1768	600
Fuego	14° N	1799	600
Tambora	8° S	1815	3000
Galunggung	7° S	1822	500
Coseguina	13° N	1835	4000 [☆]
Amargura	18° S	1846	1000
Cotopaxi	1° S	1856	700
Makjan	0,5° N	1860	800
Krakatoa	6° S	1883	1000
Tarawera	38° S	1886	800
Thomson Island	54° S		400
Santa Maria	14° N	1902	600
Agung	8° S	1963	800

Tableau 29 : Eruptions volcaniques survenues dans l'Hémisphère Sud et dans la zone équatoriale Nord (0 à 20° N), entre 1759 et 1978), dont le d.v.i est supérieur ou égal à 400 (Lamb, 1970).

Evènement n°	Profondeur (m de neige)	ρ_c	Profondeur (m d'eau)	Date du repère dans la neige	Interprétation (date de l'éruption+1 an)	Φ (kg/km ²) en H ₂ SO ₄	V.E.I.	d.v.i.
1	1,35	0,351	0,47	1963	Agung (1964)	7,6 \pm 1,3	4	800
2	2,07	0,354	0,73	1955	Nilahue (1956)	2,3 \pm 0,7	4	?
3	5,83	0,379	2,21	1907	Santa Maria (1903)	4,4 \pm 1,4	6	600
4	7,53	0,391	2,94	1885	Tarawera (1887)	3,7 \pm 1,0	5	800
	7,72	0,392	3,03	1882	Krakatoa ⁺ (1884)	5,8 \pm 1,3	6	1000
5	9,25	0,403	3,73	1860	Cotopaxi (1857) Makjan (1861)	3,4 \pm 1,2	4 ?	700 800
6	10,22	0,41	4,19	1845	Amargura (1847)	3,5 \pm 1,2	?	1000
7	10,55	0,412	4,35	1840	Coseguina (1836)	4,6 \pm 1,0	5	(4000)
8	11,53	0,42	4,84	1824	Galunggung (1823)	12,9 \pm 1,3	5 ?	500
9	12,00	0,423	5,08	1816	Tambora (1816)	16,8 \pm 1,4	7	3000
Evènement "HCl"	6,85	0,386	2,64	1894	Thomson Island (1895 ou 1896)			400

Tableau 30 : Identification des différents évènements enregistrés dans la neige déposée au Dôme C
durant les 200 dernières années

3.2.3.2.3. Retombées d'acides halogénés d'origine volcanique

Pour tous les évènements volcaniques précédemment considérés, nos mesures montrent que les débris solubles sont exclusivement constitués d'acide sulfurique. En particulier aucune modification de la teneur en nitrate de la neige n'est apparente en période volcanique sur nos profils (voir figures 13, 14, 40 et 63) contrairement à ce qui a parfois été suggéré par d'autres auteurs (Kyle et al., 1982) pour la neige antarctique.

Les émanations de gaz volcaniques sont riches non seulement en composés soufrés, mais aussi en composés tels que l'acide chlorhydrique et l'acide fluorhydrique. Au cours de cette étude, nous n'avons pas mesuré l'ion fluorure (F^-), nous avons néanmoins pu estimer que sa contribution restait très modeste dans la précipitation antarctique ($[F^-] < 0,25 \mu Eq.l^{-1}$), voir paragraphe 4.1., chapitre 3). Pour tous les accidents volcaniques mis en évidence par notre profil d'acide sulfurique, nous n'avons jamais constaté de variations des teneurs en chlore (voir figures 13, 14, 40 et 63). Les éruptions du Mont Agung, du Krakatoa et du Tambora (voir tableau 31) ont introduit dans l'atmosphère des quantités très importantes de SO_2 mais aussi de chlore; nous n'observons pas de modification significative de la teneur en chlore de la précipitation durant ces périodes.

Eruption	Masse d' H_2SO_4 (MT)	Masse d'HCl (MT)
Agung	2,84	1,53
Krakatoa	2,94	3,75
Tambora	52,4	216

Tableau 31 : Estimation des émissions d'HCl et H_2SO_4 lors des éruptions de l'Agung, du Krakatoa et du Tambora d'après Devine et al. 1984.

L'acide chlorhydrique, trois cents fois plus soluble dans l'eau que le SO_2 , doit en fait être rapidement repris après émission par la vapeur d'eau présente dans le panache et dans l'atmosphère.

Ainsi pour les éruptions se produisant dans la zone équatoriale, comme le Mt Agung, seul le dioxyde de soufre émis, par suite de sa lente oxydation en acide sulfurique, a un temps de séjour suffisamment long pour contaminer les hautes latitudes. Cette conclusion est d'ailleurs en accord avec une étude de Lazrus et al. 1979 qui montre que l'éruption du Fuego (1974) a émis des quantités importantes de SO_2 et de HCl dans l'atmosphère mais que seule une augmentation du SO_2 a pu être mise en évidence dans la stratosphère.

Au Groënland, suite à l'éruption de l'Eldjar (Islande, 940 A.D.), Herron M. and Herron S. observent une augmentation simultanée des teneurs en SO_4^{--} , Cl^- et F^- de la couche de neige correspondante. De même, Herron (1980) a montré que l'éruption de Laki a été suivie d'une augmentation significative des teneurs en SO_4^{--} mais aussi de F^- dans la précipitation. Ces résultats du Groënland suggèrent que les éruptions volcaniques peuvent être suivies de retombées d'acides halogénés dans les calottes polaires mais uniquement si le lieu d'émission n'est pas trop éloigné de celles-ci (ce qui est le cas de la neige du Groënland, continent très proche des volcans d'Islande).

Sur notre profil au Dôme C, à 6,95 m de profondeur (par rapport à la surface 1978) nous observons d'une part une forte augmentation de la teneur en HCl associée à des rapports Cl/Na très élevés (figure 61), d'autre part une valeur de Na très élevée (supérieure à 60 ng.g^{-1}) au lieu de 26 ng.g^{-1} en moyenne, voir figure 13, paragraphe 4.3.2., chapitre 1). Cet événement qui correspond à l'année 1894 et dure deux ans environ pourrait correspondre à l'éruption de la Thomson Island (1895 ou 1896, voir tableaux 29 et 30). Ce volcan a la particularité d'être localisé à haute latitude dans l'Hémisphère Sud (54° S) et d'être entré en éruption en-dessous du niveau de la mer (Lamb, 1967). La retombée d'HCl pourrait ainsi s'expliquer soit comme au Groënland en cas d'activité volcanique en Islande par la proximité du volcan, soit par le fait que cette éruption a émis dans l'eau de mer du SO_2 qui s'est converti en acide chlorhydrique suivant la réaction : $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{NaCl} \rightarrow 2\text{HCl} + \text{Na}_2\text{SO}_4$.

La forte teneur en sodium observée peut être due à une véritable pulvérisation de gouttelettes d'eau de mer dans l'atmosphère au moment de l'explosion.

3.2.3.3. RECHERCHE DU PALEOVOLCANISME EN D'AUTRES SITES DE L'ANTARCTIQUE

3.2.3.3.1. Recherche de l'horizon Tambora-Galunggung par conductivité

----- dans la neige du Pôle Sud -----

Comme nous l'avons vu précédemment, l'imprécision de la datation des couches n'a pas permis d'identifier avec certitude le niveau Tambora (1815) dans le profil d'acide sulfurique du Dôme C. Par contre, nous avons suggéré que le pic le plus important de ce profil était situé à une profondeur telle que son attribution aux retombées du Tambora était tout à fait plausible, compte tenu que, tant dans l'échelle d.v.i. que dans l'échelle V.E.I., le Tambora apparaissait bien comme l'éruption volcanique la plus puissante des 200 dernières années. Des mesures conductimétriques nous ont permis de confirmer cette hypothèse au Pôle Sud où l'âge des couches de neige est connu avec une précision satisfaisante. Les études stratigraphique et isotopique de Jouzel et al. (1983) ont permis de calculer une accumulation moyenne annuelle de 8,5 g d'eau par an pour la période 1930 - 1978 et de $10,3 \pm 1,2$ g sur la période 1887 - 1930.

Pendant l'été 1983-84, sept forages de trente mètres (notés PS₁, PS₂, PS₉, PS₁₂, PS₁₃, PS₁₄ et PS₁₅) réalisés dans un rayon de dix kilomètres autour de la base du Pôle Sud ont été étudiés par mesure de la conductivité "solide". La discussion et l'optimisation des conditions expérimentales de cette manipulation sortent du cadre de ce travail. Nous nous limiterons à donner les conditions expérimentales choisies sans les commenter : température des carottes - 15°C, tension appliquée 1000 V, utilisation de deux électrodes de surface. Comme nous l'avons souligné au début de ce chapitre (paragraphe 3.2.2.), la conductivité "solide" étant une méthode indirecte de mise en évidence des retombées de produits acides d'origine volcanique, elle doit être validée par une étude globale de la chimie des couches de neige (bilan ionique). Dans un site comme le Pôle Sud, le problème soulevé par Zanolini (1982) du rôle privilégié de l'acide nitrique pour la conductivité "solide" devient particulièrement crucial car nos mesures de chimie ont mis en évidence une contribution particulièrement importante de l'acide nitrique à

l'acidité totale (45%, voir tableau 10, chapitre 3). Ces sept forages ayant été réalisés tout récemment, l'étude chimique complète n'a pas pu être réalisée dans le cadre de ce travail. Par contre, nous avons pu effectuer sur le terrain un profil continu de la conductivité liquide sur le forage PS₂. Ces mesures de conductivité liquide confirment tout à fait le profil de conductivité "solide" obtenu (voir figure 67). Par ailleurs, la présence d'acide nitrique ne semble pas influencer notablement ces mesures par suite sans doute des faibles variations temporelles des teneurs de cet acide en ce site à l'échelle de la dizaine d'années ($[\text{NO}_3^-] = 1,42 \pm 0,20 \mu\text{Eq.l}^{-1}$ au Pôle Sud, voir chapitre 3 à comparer avec $[\text{NO}_3^-] = 1,38 \pm 1,00 \mu\text{Eq.l}^{-1}$ à D 57, Zanolini (1982)).

L'étude du forage PS₁₄ réalisé à environ une cinquantaine de mètres du puits de dix mètres daté par Jouzel et al. 1983, est intéressante car elle permet de confirmer l'interprétation des deux événements très importants (séparés d'environ sept ans) que nous avons repérés dans la neige du Dôme C et attribués aux éruptions du Tambora (1815) et du Galunggung (1822). Entre 0 et 30,40 m, le profil de conductivité solide obtenu (PS₁₄) met en évidence deux perturbations majeures à 27,8 et 28,6 m de profondeur (en neige).

Le tableau ci-dessous (tableau 32) montre que les profondeurs des couches de neige déposées durant les années 1816 et 1823 (c'est-à-dire un an après les éruptions du Tambora en 1815 et du Galunggung en 1822) concordent très bien (à 20 cm près, soit une erreur de 2 ans sur 168 ans) avec les dates de ces deux événements.

	Age BP	P _{H₂O}	ρ_c	P _{neige}	Evènement
Couche de neige déposée en 1816	168 ans	14,28 m	0,502	28,5 m	28,6 m
Couche de neige déposée en 1823	161 ans	13,69 m	0,499	27,5 m	27,8 m

Tableau 32 : Comparaison des profondeurs en neige des deux plus importants événements décelés le long du forage PS₁₄ (Pôle Sud) avec les profondeurs estimées (en assumant une accumulation de 8,5 g H₂O/an, Jouzel et al. 1983) des couches 1816 et 1823.

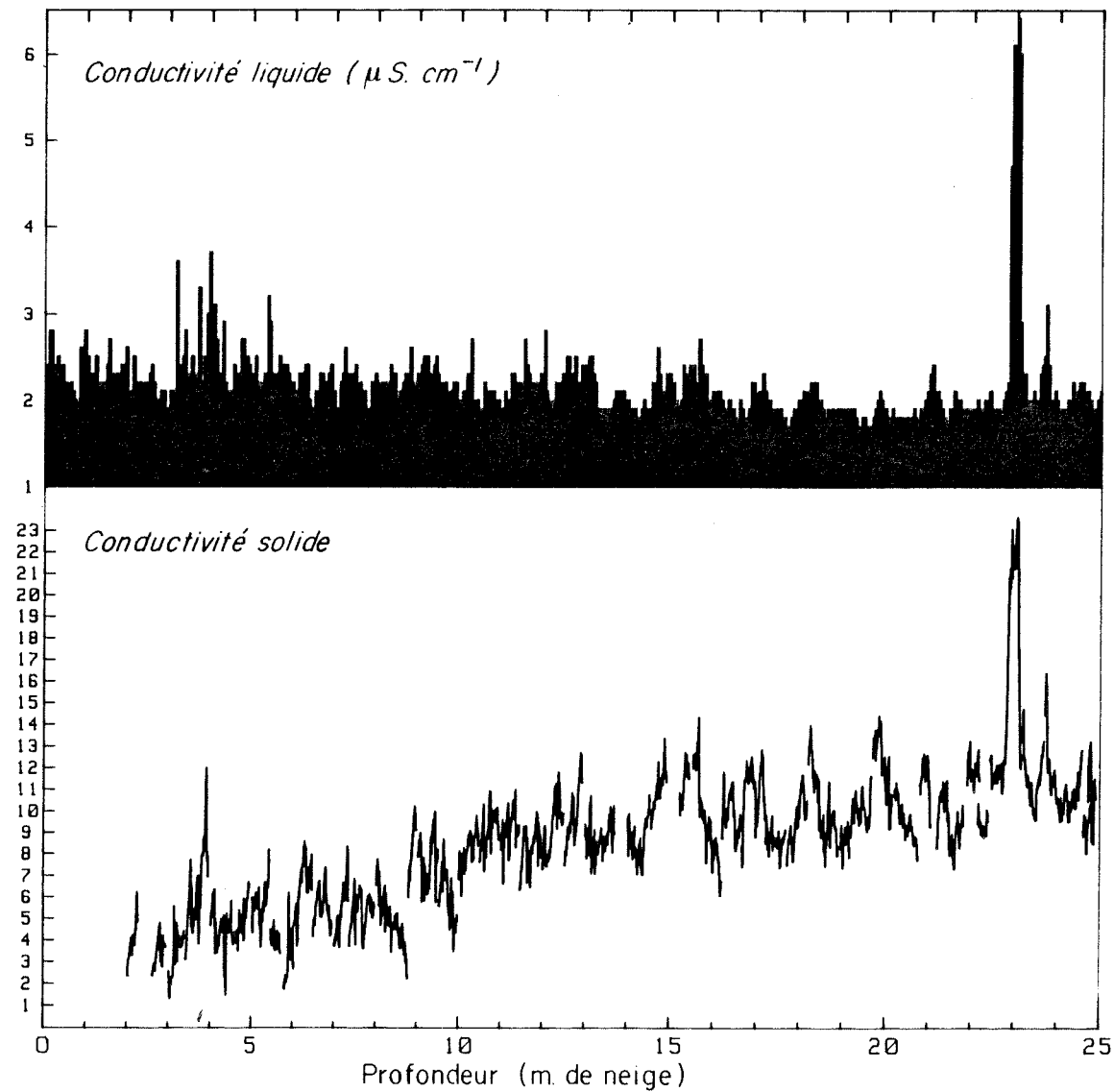


Figure 67 : Comparaison des profils de conductivité solide (unité relative) et de conductivité liquide sur le forage PS₂ (Pôle Sud).

A l'inverse, comme nous le verrons un peu plus loin, l'existence de ce doublé "Tambora-Galunggung" constitue en soi un remarquable outil de datation absolue dans les sites Antarctiques où la datation est difficile.

De plus, la comparaison des profils de conductivité solide obtenus sur les sept forages permet d'apprécier la reproductibilité de la signature d'une éruption volcanique dans la neige, en un site donné. La figure 68 montre que sur sept forages l'évènement Galunggung (en haut de la carotte considérée) est toujours très bien enregistré. Par contre, l'évènement Tambora (en bas de la carotte, figure 68) bien visible dans quatre des forages (PS₉, PS₁₂, PS₁₄ et PS₁₅) disparaît partiellement dans le forage PS₂ et même totalement dans les forages PS₁ et PS₁₃. Notons d'ailleurs qu'une étude de la conductivité "solide" a été menée par Schwander en 1984 sur un forage situé à environ deux cents mètres de notre forage PS₁, seul un pic (à 30 m de profondeur) a été détecté; ce qui confirme tout à fait nos résultats dans PS₁ (pic à 29,60 m, voir figure 68). Le fait que les retombées du Tambora soient décelables dans les autres carottages voisins fait penser qu'il ne s'agit pas d'un manque de précipitation au Pôle Sud au moment de la présence de ces retombées dans l'atmosphère locale, mais plutôt d'une reprise par le vent de la couche de neige correspondante. Ceci constitue une difficulté insurmontable et inhérente à la recherche du paléovolcanisme dans la neige antarctique.

D'autre part, la comparaison des profondeurs auxquelles ces deux évènements sont enregistrés montre bien l'importante variabilité de l'accumulation à l'échelle de quelques km (tableau 33).

Forages	Azimut	Distance de la base	Horizon Tambora	Horizon Galunggung	Accumulation obtenue en g H ₂ O/an
PS ₁	58°W	418 m	?	29,60m	9,3
PS ₂	1°W	4400 m	? 23,80m	23,00 m	6,9
PS ₉	110°E	5400 m	22,80m	22,00 m	6,6
PS ₁₂	110°E	5400 m	22,60m	21,80 m	6,5
PS ₁₃	110°E	3400 m	?	26,80 m	8,2
PS ₁₄	90°E	3000 m	28,60m	27,80 m	8,6
PS ₁₅	70°W	6200 m	25,80m	25,00 m	7,6

Tableau 33 : Taux d'accumulation annuels obtenus, à partir de sept forages étudiés, à l'aide des horizons repères Tambora et Galunggung.

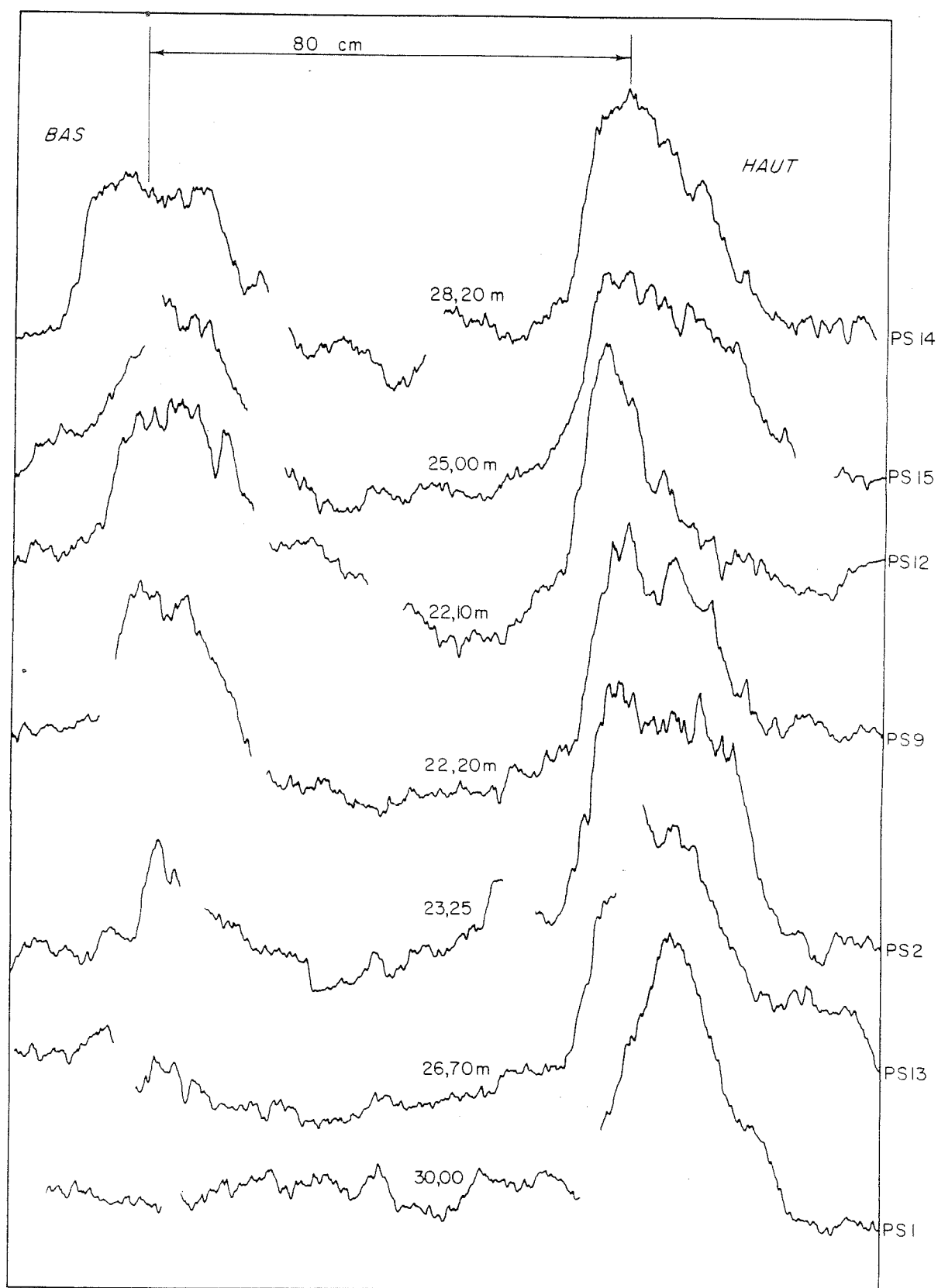


Figure 68 : Comparaison des deux seuls signaux importants obtenus en conductivité solide sur sept forages distincts, réalisés dans un rayon de 10 km autour de la base du Pôle Sud : le bas de la carotte est représenté à gauche de la figure.

Les accumulations moyennes ainsi obtenues sur 160 ans vont de 6,6 à 9,3 g $\text{H}_2\text{O}/\text{an}$ et confirment bien la variabilité géographique de l'accumulation au Pôle Sud (Jouzel et al. 1983).

3.2.3.3.2. Horizon Tambora-Galunggung dans la neige de D 57

Sur la base des résultats de mesures conductimétriques réalisées sur une carotte de 200 mètres provenant de D 57, Zanolini (1982) a effectué l'étude systématique des ions NO_3^- , SO_4^{--} et H^+ dans les couches de neige présentant une valeur élevée de la conductivité. Sur les cent premiers mètres du forage, Zanolini (1982) met en évidence deux pics importants de H^+ et de SO_4^{--} , l'un à 48 et l'autre à 50 mètres de profondeur (en mètres de neige). Malheureusement, la datation de ce forage est particulièrement difficile; certes, la mesure de la radioactivité globale β des couches superficielles donne une accumulation moyenne de 40,4 g d' $\text{H}_2\text{O}/\text{an}$ sur la période 1965-1981 (Michel Pourchet, communication personnelle) mais on ne peut raisonnablement pas utiliser cette valeur pour dater l'ensemble du forage. En effet, la balise D 57, distante de 203 km de la côte (sur l'axe Dumont d'Urville-Dôme C, voir figure 17, chapitre 2) est située dans une région où l'écoulement de la calotte est important comme l'indique la forte vitesse de déplacement de la neige en surface (de l'ordre de 50 mètres par an). Ainsi, la glace déposée il y a 160 ans (période Tambora-Galunggung) provient en réalité de 8 km environ en amont de D 57. La très grande variabilité des accumulations mesurées en surface dans cette région (tableau 34) met bien en évidence les difficultés de la datation du forage. La présence du doublet (visible sur les profils de H^+ et SO_4^{--} ; Zanolini et al., sous presse) dans le carottage de D 57 suggère, par analogie avec nos résultats du Dôme C bien confirmés par ceux du Pôle Sud, que ces deux événements volcaniques seraient en fait les éruptions du Tambora et du Galunggung. Le calcul de la masse de produits volcaniques déposée par unité de surface, qui est fonction du taux d'accumulation, comme nous le verrons au paragraphe 3.2.4., vient d'ailleurs appuyer cette hypothèse.

Site	Distance en amont de D57	Accumulation (g H ₂ O/an)
D 57	0 km	40,4 \pm 9,0
D 58	10 km	29,1 \pm 14,7
D 58 S	15 km	4,0 \pm 0,9
D 59 O	16 km	14,1 \pm 7,4
D 59	20 km	31,1 \pm 5,5

Tableau 34 : Valeurs du taux d'accumulation annuel en amont de D 57
(Michel Pourchet, communication personnelle)

3.2.3.3.3. Recherche des retombées du Mont Agung au Pôle Sud et en

Terre Adélie (Balises D 55 et D 80)

La recherche des retombées de l'éruption du Mont Agung a été tentée par mesure de la conductivité "solide" au Pôle Sud à l'occasion de l'étude du doublé "Tambora-Galunggung". La figure 67 (forage PS₂) suggère que le pic observé à 3,97 m de profondeur, pic confirmé par les mesures de conductivité liquide, est lié à l'éruption du Mont Agung (1963). Certes l'accumulation obtenue à partir de la profondeur observée de cet événement donne pour la période 1965-1984 une valeur de 8,1 g d'eau/an, valeur supérieure à celle obtenue sur 160 ans à partir de l'horizon Tambora (6,79 g H₂O/an, voir tableau 33, paragraphe 32331) sur ce même forage. Cependant, l'augmentation de 16% du taux d'accumulation obtenue sur la période 1965-1984 n'est pas surprenante si l'on considère l'augmentation de 10% observée par Pourchet et al. (1983) au Pôle Sud entre les périodes 1955 - 1965 et 1965 - 1978. Notons enfin (figure 67) que la mise en évidence des retombées de l'éruption du Mont Agung n'a pas été aisée par conductivité "solide". Nous pouvons en effet observer une mauvaise stabilité des bruits de fond entre 2 et 10 mètres environ. Ceci est probablement lié à un problème de dispersion des lignes de courant entre les électrodes, phénomène d'autant plus marqué que le névé est peu dense.

Outre cette recherche par conductivité "solide" et liquide, nous avons, après avoir mesuré les ions majeurs dans la neige déposée durant la période 1959 - 1969, identifié à partir des profils de teneur en acide sulfurique les retombées de l'éruption du Mont Agung non seulement à la Station Pôle Sud, mais aussi aux balises D 55 et D 80 en Terre Adélie.

3.2.3.4. COMPARAISON AVEC LES RESULTATS DE HAMMER AU GROENLAND

Il est intéressant de comparer nos résultats avec ceux obtenus par Hammer (1977) dans la neige de la Station Crête au Groenland. Par mesure de la conductivité liquide, Hammer met en évidence sept événements (sur la période 1780 - 1970) dont l'Agung, le Krakatoa, le Coseguina et le Tambora. L'observation de l'importance des retombées du Coseguina (13°N) et du Tambora (8°S) sur ce profil confirme bien que le d.v.i. affecté par Lamb à l'éruption du Coseguina est surestimé comme nos résultats le suggèrent aussi (voir paragraphe 3.2.3.2.2.).

Outre ces quatre éruptions, Hammer met en évidence les retombées du Katmai (1912, 58°N) du Pogrumni (1795, 55°N) et du Laki (1783, 64°N). Le fait que les éruptions du Katmai et du Pogrumni ne soient pas enregistrées dans la neige antarctique s'explique aisément en considérant à la fois le d.v.i. moyen que leur affecte Lamb (respectivement 500 et 1000), et la situation géographique (haute latitude de l'hémisphère Nord) de ces deux volcans. Remarquons d'ailleurs, qu'à l'inverse, Hammer ne détecte pas l'éruption du Tarawera (1886, d.v.i. = 800, 38°S) que nos mesures semblent avoir mis en évidence. Nous n'avons pas décelé les retombées de l'éruption de Laki dans la neige antarctique (profondeur estimée à 14 m, voir figure 65), mais il semble bien, comme le suggère le profil obtenu par Hammer (1980), que cette importante éruption (d.v.i. = 2300) n'ait provoqué une perturbation majeure que dans la basse atmosphère. En effet, la durée de la perturbation qu'observe Hammer est de un an au lieu des deux ans généralement observés pour une éruption à l'échelle globale avec injection dans la stratosphère (voir Hammer 1980, Hammer et al. 1980, Legrand et Delmas 1984).

3.2.4. FLUX DE RETOMBÉES D'ACIDE SULFURIQUE VOLCANIQUE

Si l'on veut comparer quantitativement les différents événements volcaniques entre eux tels qu'ils sont enregistrés dans la neige, il est nécessaire de calculer les flux de retombées d'acide sulfurique correspondants. D'autre part, dans le but d'établir une comparaison interhémisphérique des perturbations de la chimie atmosphérique occasionnées par une éruption volcanique donnée, il nous est apparu nécessaire d'étudier la variation des flux de retombées d'acide sulfurique en fonction du taux d'accumulation.

Sur la base de cette étude des flux de retombées d'acide sulfurique en plusieurs sites de l'Antarctique, nous tenterons d'estimer la masse totale de H_2SO_4 déposée à l'échelle du globe puis de la comparer à la fonction source estimée.

La masse (par unité de surface) d'acide sulfurique d'origine volcanique contenue dans une couche de neige peut être évaluée à partir de la surface du pic correspondant situé au-dessus du bruit de fond de la courbe des teneurs en acide sulfurique de la neige :

$$\Phi_{(kg/km^2)} = 48 \times \rho_h \left(\sum_i c_i d_i - c_0 \sum_i d_i \right) \quad (29)$$

- avec ρ_h la densité moyenne de la neige correspondant à cet événement
- les grandeurs c_i (en $\mu Eq.l^{-1}$) et d_i (en cm) sont définies sur la figure 69.

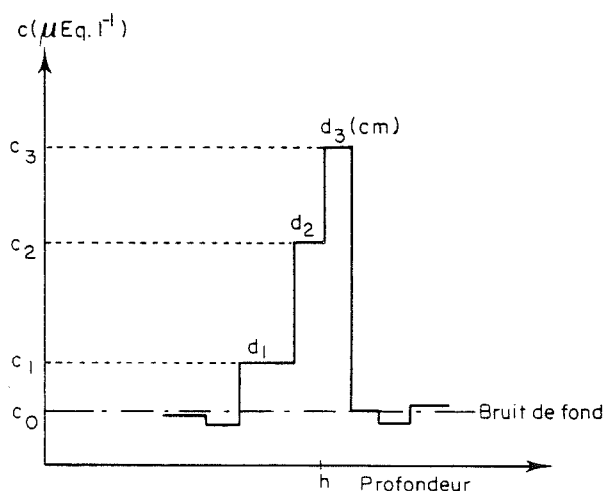


Figure 69 : Définitions des variables d_i , c_i et c_0 utilisées pour évaluer la masse de produits volcaniques déposés (voir équation 29) .

Cependant, une telle étude se heurte à deux difficultés :

. La première est liée à la détermination du bruit de fond d'acide sulfurique d'origine non volcanique (Delmas et Boutron, 1980; Legrand et Delmas, 1984) qu'il faut soustraire aux valeurs brutes de la teneur en acide sulfurique.

. La seconde tient au fait qu'il n'est pas possible dans la plupart des sites étudiés, à l'exception du Pôle Sud, (D 55, D 57, D 80 et le Dôme C) de connaître le taux d'accumulation exact pour chaque événement (celui-ci pouvant varier notablement d'une année sur l'autre autour de la valeur moyenne obtenue pour une période donnée).

Outre ces deux difficultés au niveau du calcul, rappelons l'observation faite au paragraphe 32331 à savoir qu'une couche de neige déposée dans la période qui suit une éruption peut partiellement ou entièrement disparaître sous l'effet du vent.

3.2.4.1. FLUX OBSERVES EN DIFFERENTES STATIONS DE L'ANTARCTIQUE APRES LES ERUPTIONS DU MONT AGUNG (1963) et du TAMBORA (1815) : INFLUENCE DU TAUX D'ACCUMULATION

Dans le cadre de l'étude des retombées d'acide sulfurique d'origine volcanique, le cas du Mont Agung est particulièrement intéressant. En effet, la date de cette éruption coïncide bien avec l'importante série de tests nucléaires atmosphériques effectués en 1961-62 dans l'hémisphère nord. Ces deux accidents atmosphériques ont donné lieu à d'importantes injections de produits dans la stratosphère où leur transport ultérieur jusqu'en Antarctique a été du même type. En effet, l'écart de un an environ entre l'éruption de l'Agung et les tests nucléaires doit être compensé du fait que ces derniers ont été réalisés dans l'hémisphère nord. Les teneurs en radioélément d'une part, en acide sulfurique d'autre part, devraient subir des perturbations similaires dans la neige de l'Antarctique. Cette hypothèse est appuyée par les résultats de l'étude des variations saisonnières enregistrées dans la neige du Pôle Sud (voir § 3.1.2.). Ceci sera donc un atout certain pour contrôler une reprise éventuelle par le vent de la couche de neige déposée entre 1964 et 1966.

Pour l'évènement Agung, nous avons évalué les quantités d'acide sulfurique dans la neige à D 55, D 80, Pôle Sud et Dôme C. Les résultats et paramètres utilisés pour le calcul du flux (équation 29) relatifs à chaque station sont présentés dans le tableau 35.

Pour les évènements Tambora et Galunggung les données dont nous disposons sont moins homogènes. En effet, si la teneur en acide sulfurique a été évaluée au Dôme C, à D 57 nous ne disposons que des teneurs en sulfate et en proton (Zanolini 1982) et au Pôle Sud que des valeurs de conductivité liquide obtenues sur le forage PS₉ (les valeurs obtenues sur le forage PS₂ n'étant pas représentatives pour le Tambora, comme nous l'avons vu au paragraphe 32331. Pour le cas de D 57, nous pouvons raisonnablement penser que les augmentations de la teneur en sulfate représentent quantitativement des augmentations d'acide sulfurique. En effet, l'interférence due à une quantité importante de Na₂SO₄, associée à des rapports Cl/Na très inférieurs au rapport dans l'eau de mer, (cas que nous avons rencontré au Dôme C, voir figure 61, paragraphe 3225) est très peu probable ici car comme nous l'avons vu au paragraphe 2, le rapport Cl/Na en ce site reste voisin de 1,8. Pour le Pôle Sud, nous admettrons que les variations du paramètre conductivité liquide sont dues essentiellement à l'acide sulfurique, nos résultats obtenus en surface montrent en effet d'une part que même si la teneur en acide nitrique est importante, elle varie peu au cours du temps, d'autre part que la contribution de l'acide chlorhydrique à l'acidité totale reste modeste (15,4% ± 6,0, chapitre 3). Les teneurs en acide sulfurique au Pôle Sud, c_i , ont donc été évaluées à partir des valeurs de la conductivité liquide C_i (en $\mu\text{S}/\text{cm}$) par :

$$c_i = \frac{C_i}{0,438} \quad (30)$$

0,438 représentant la conductivité équivalente limite de l'acide sulfurique à 25°C.

Le bruit de fond (c_0) a été évalué en faisant une moyenne d'échantillons choisis autour du pic (Agung : figure 70, Tambora : figure 71, Galunggung : figure 72). L'évaluation des flux est présentée dans les tableaux 35 (Agung) 36 (Tambora) et 37 (Galunggung).

Pour ces trois évènements, la masse d'acide sulfurique déposée en un site donné est fonction de l'accumulation de ce site comme le mettent en évidence les figures 73 (Agung), 74 (Tambora) et 75 (Galunggung).

Sites	h (m)	ρ_h	$C_o (\mu\text{Eq.l}^{-1})$	$\sum_i d_i$ (cm)	$\Phi(\text{kg/km}^2)$	$a(\text{gH}_2\text{O/an})$
D 55	3,04	0,472	$0,76 \pm 0,33$	14 (1 an)	$2,6 \pm 1,0$	7,0
D 80	9,00	0,514	$0,58 \pm 0,15$	110 (2,5ans)	$14,6 \pm 4,1$	22,9
Pôle Sud	3,00	0,404	$1,06 \pm 0,38$	34 (2ans)	$11,1 \pm 2,5$	8,5
Dôme C	1,55	0,360	$1,17 \pm 0,39$	20 (2ans)	$7,6 \pm 1,3$	3,2

Tableau 35 : Evaluation des retombées de H_2SO_4 après l'Agung (1963) en différents sites de l'Antarctique.

D 57	50,20	0,725	$0,65 \pm 0,34$	57	$47,9 \pm 6,7$	18,50
Pôle Sud	22,80	0,558	-	32	$27,5 \pm 2,3$	6,64
Dôme C	12,00	0,488	$0,57 \pm 0,23$	26	$16,8 \pm 1,4$	3,2

Tableau 36 : Evaluation des retombées de H_2SO_4 après l'éruption du Tambora en différents sites de l'Antarctique.

D 57	48,20	0,72	$0,65 \pm 0,27$	334	$49,3 \pm 3,2$	18,2
Pôle Sud	21,80	0,554		21	$33,3 \pm 1,5$	6,6
Dôme C	11,54	0,484	$0,72 \pm 0,28$	17	$12,9 \pm 1,3$	3,2

Tableau 37 : Evaluation des retombées de H_2SO_4 après l'éruption du Galunggung en différents sites de l'Antarctique.

Pour l'Agung (figure 73) le point obtenu à D 55 donne une masse déposée semble-t-il trop faible. La largeur du pic (14 cm, voir figure 70) semble elle aussi trop faible; elle correspond en effet à une durée de un an au lieu des deux ans que nous constatons dans les autres sites (tableau 35). La comparaison avec le profil de radioactivité globale β portant sur une série d'échantillons prélevés à 80 cm de notre profil de sulfate suggère que nous sommes en présence d'un cas de déformation du signal volcanique par oblitération partielle (sans doute sous l'effet du vent) de la couche 1964-1966. Nous pouvons grossièrement estimer avoir perdu la moitié du signal (14 cm de largeur obtenue pour le signal volcanique à comparer aux 30 cm de largeur du signal donné par la radioactivité globale β , Michel Pourchet, communication personnelle). En affectant une valeur de $5,2 \text{ kg/km}^2$ au lieu de $2,6 \text{ kg/km}^2$ à la masse (par unité de surface) déposée à D 55 (voir tableau 35, figure 73), nous avons calculé la droite des moindres carrés entre la masse déposée (Φ) et le taux d'accumulation (a) pour l'Agung et pour le Tambora.

	Régression linéaire $\Phi = f(a)$	coefficient de corrélation r	dépôt sec
Agung	$\Phi = 5,5 + 0,4 a$	0,84	$5,5 \text{ kg/km}^2$
Tambora	$\Phi = 12,3 + 1,60 a$	0,99	$12,3 \text{ kg/km}^2$

Tableau 38 : Relation entre la masse (Φ) de produits volcaniques (H_2SO_4) déposés et le taux d'accumulation annuel (a) pour l'Agung et le Tambora.

L'ordonnée à l'origine non nulle observée pour ces deux droites (tableau 38) montre qu'une partie de l'acide sulfurique volcanique se dépose directement au sol en l'absence de précipitation ($a = 0$). La fraction correspondante à ce dépôt (appelé dépôt sec) permet d'évaluer l'importance respective des deux processus de déposition (dépôts sec et humide) des produits volcaniques dans la neige. Le tableau 39 montre clairement l'importance du processus de dépôt sec pour ce type d'impuretés dans les régions centrales (72 % au Dôme C, 48 % au Pôle Sud); ce processus devient proportionnellement moins important en zones côtières (32 % à D 57 ou D 80). Ces résultats sont en bon accord avec les résultats d'autres études (voir tableau 39).

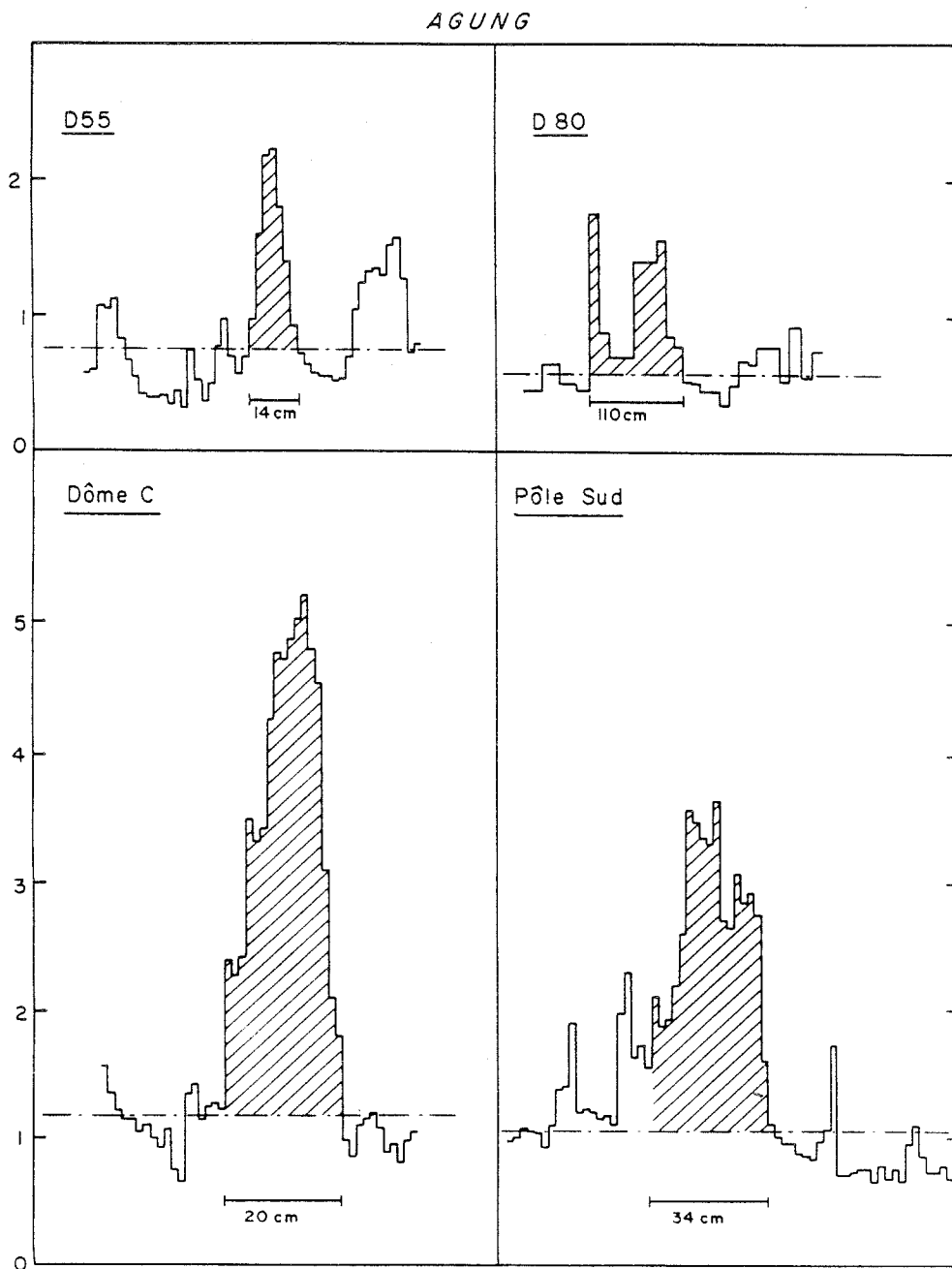


Figure 70 : Signal volcanique (en H_2SO_4) obtenu après l'éruption de l'Agung en différents sites de l'Antarctique: la surface hachurée correspond à la surface prise en compte pour le calcul de la masse de H_2SO_4 déposée.

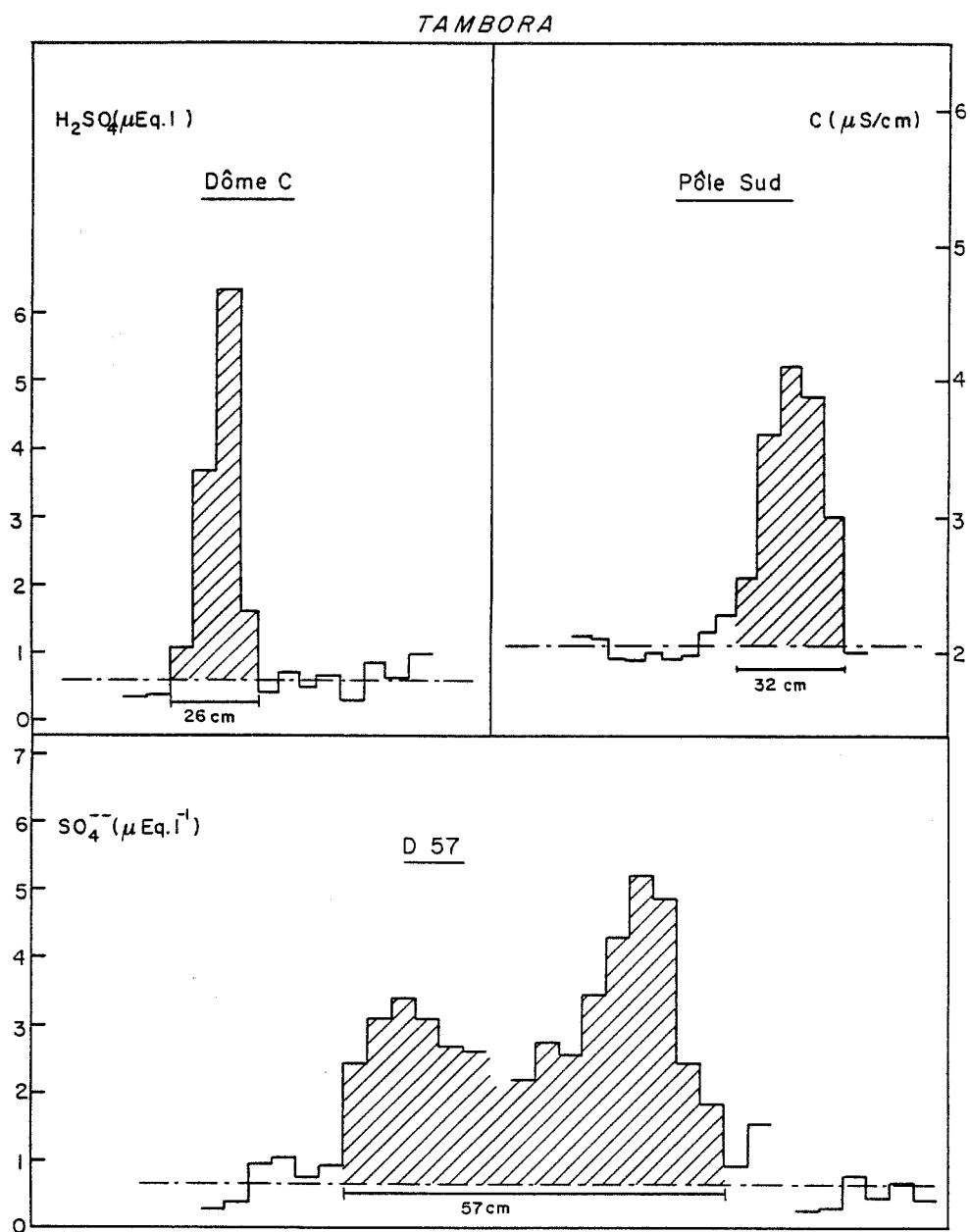


Figure 71 : Signal volcanique obtenu après l'éruption du Tambora à Dôme C (profil d' H_2SO_4), Pôle Sud (profil de conductivité liquide) et à D 57 (teneur en sulfate).

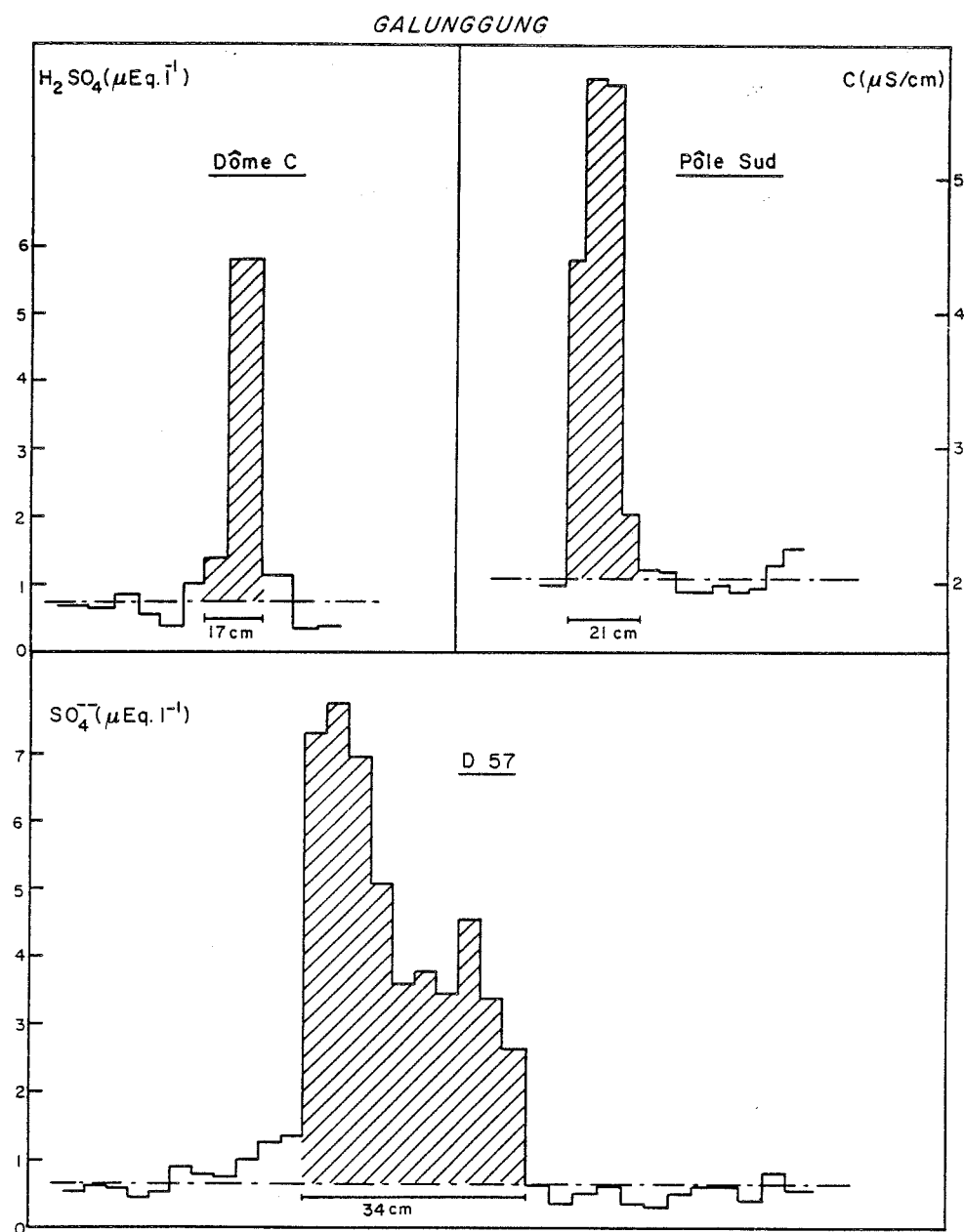


Figure 72 : Signal volcanique obtenu après l'éruption du Galunggung à Dôme C (profil H_2SO_4), Pôle Sud (conductivité liquide) et à D 57 (teneur en sulfate).

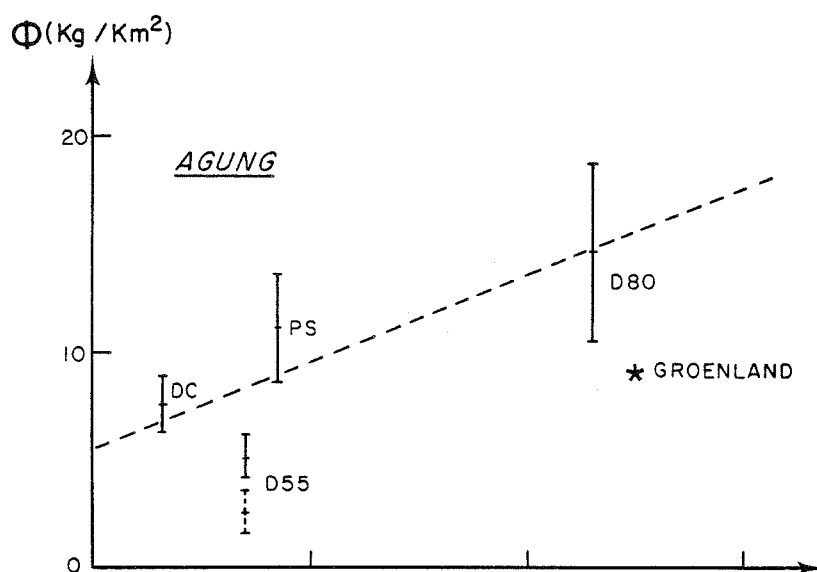


Figure 73 : Variations de la masse (Φ) d'acide sulfurique déposée en Antarctique en fonction du taux d'accumulation (a) après l'éruption de l'Agung.

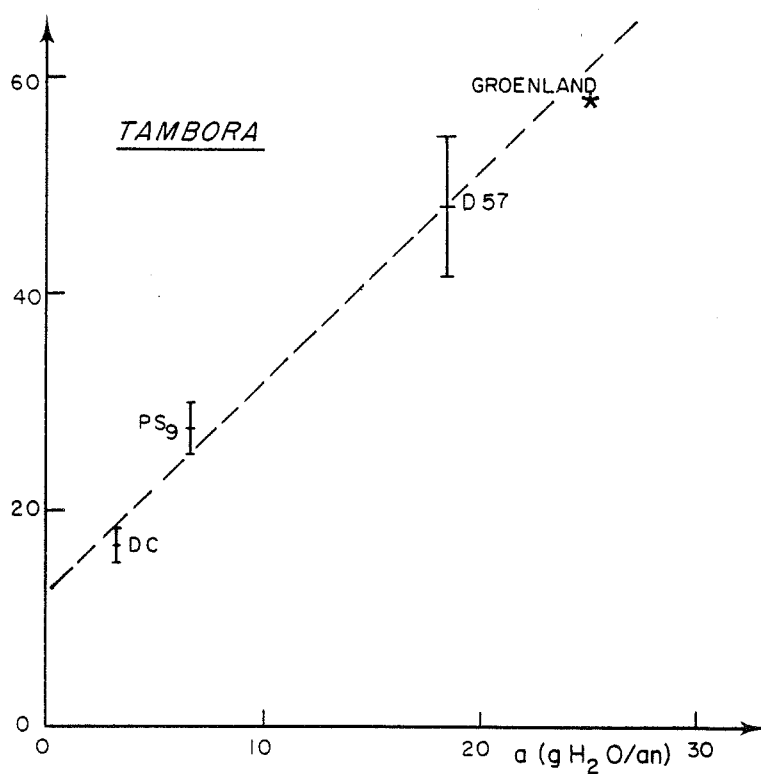


Figure 74 : Variations de la masse (Φ) d'acide sulfurique déposée en Antarctique en fonction du taux d'accumulation (a) après l'éruption du Tambora.

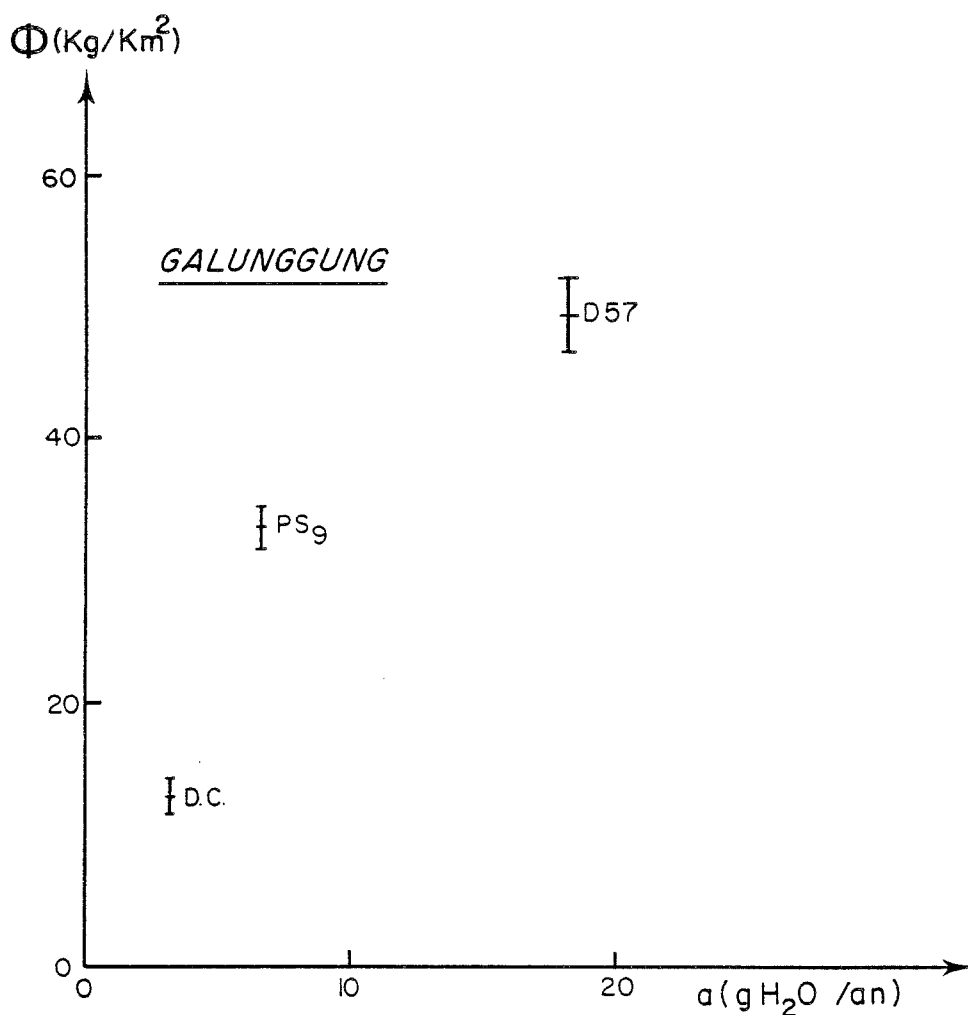


Figure 75 : Variations de la masse (Φ) d'acide sulfurique déposée en Antarctique en fonction du taux d'accumulation (a) après l'éruption du Galunggung.

Nous ne discuterons pas en détail les résultats obtenus pour l'éruption du Galunggung car l'évaluation de son flux n'est pas satisfaisante dans le site du Dôme C. En effet, comme nous en avons fait état précédemment (paragraphe 32321.) la décontamination des échantillons correspondant à cet événement s'est effectuée à partir d'une demi-carotte qui avait de plus subi une importante fusion et nous avons dû en éliminer une fraction beaucoup plus grande que d'ordinaire. Ceci risque (aux vues du faible taux d'accumulation annuelle) de fausser le calcul (par défaut) de la masse totale d'acide sulfurique contenue dans ces échantillons.

% dépôt sec	Dôme C	Pôle Sud	Terre Adélie (D 57 ou D 80)
H_2SO_4 { Agung Tambora	72%	50%	38% Ce travail
	73%	45 %	26 % Ce travail
Radioéléments (β globaux)	60%	40%	29% Pourchet et al. 1983
^{210}Pb et ^{90}Sr		54% - 71%	Lambert et al. 1982

Tableau 39 : Comparaison du taux de retombées sèches pour les débris volcaniques et pour d'autres impuretés.

3.2.4.2. COMPARAISON INTERHEMISPHERIQUE DES RETOMBEES D'ACIDE SULFURIQUE
APRES LES ERUPTIONS DE L'AGUNG ET DU TAMBORA

La relation linéaire entre la masse de débris volcaniques déposée par unité de surface et l'accumulation annuelle permet d'établir une comparaison interhémisphérique du dépôt après les éruptions volcaniques du Mont Agung et du Tambora (volcans situés tous deux en Indonésie). A partir des résultats obtenus par Hammer (1980) à la station Crête du Groenland (accumulation moyenne annuelle de 25 g H_2O /an) et notre étude portant sur l'Antarctique, nous avons estimé la répartition du dépôt entre les deux hémisphères pour les éruptions de l'Agung et du Tambora (tableau 40), ceci en admettant que le dépôt en régions polaires soit représentatif de tout un hémisphère.

	Dépôt au Groenland (Hammer 1980)	Dépôt en Antarctique (cette étude)	H.N.	H.S.
Agung	9 kg/km ²	15,5 kg/km ²	1/3	2/3
Tambora	58 kg/km ²	61 kg/km ²	1/2	1/2

Tableau 40 : Estimation de la répartition interhémisphérique du dépôt de produits volcaniques après les éruptions du Mont Agung et du Tambora.

Cette comparaison suggère que l'éruption de l'Agung a beaucoup plus contaminé l'hémisphère Sud que l'hémisphère Nord, contrairement au Tambora pour lequel nous déduisons une répartition plutôt homogène entre les deux hémisphères (tableau 40). Ce résultat est en accord avec les mesures de sulfate réalisées dans la stratosphère après l'éruption de l'Agung qui montrent une augmentation quatre fois plus importante dans l'hémisphère Sud que dans l'hémisphère Nord (Castleman et al., 1974).

3.2.4.3. COMPARAISON DES RETOMBÉES GLOBALES AVEC LES QUANTITES EMISES

En prenant une accumulation annuelle moyenne de 17 g H₂O/an (Kotlyakov et al. 1974) pour l'ensemble du continent antarctique (surface 13,6 M km², nous obtenons une masse de 170000 tonnes d'acide sulfurique déposées après l'éruption de l'Agung et de 600000 tonnes après l'éruption du Tambora. Il est tentant d'extrapoler ce calcul à l'ensemble de la terre afin d'établir une comparaison avec les fonctions sources estimées de ces deux volcans.

Pour ce calcul, qui ne prétend pas être un calcul exact, nous avons considéré d'une part une retombée homogène en fonction de la latitude dans chaque hémisphère, d'autre part une retombée pondérée comme le propose Hammer 1980 à partir des mesures de ⁹⁰Sr (le dépôt des produits en régions polaires représentant le tiers environ du dépôt moyen à l'échelle d'un hémisphère pour des éruptions ayant eu lieu entre le 20°N et 20°S). Pour chacune des deux éruptions, nous avons de plus pris en considération la répartition interhémisphérique obtenue au paragraphe précédent (1/3, 2/3 pour l'Agung, 1/2 et 1/2 pour le Tambora).

	Dépôt total estimé (MT) cette étude	Emission (MT)
Agung	5 - 15	18 (Cadle et al. 1976) 2,8 (Devine et al. 1984)
Tambora	23 - 70	52 (Devine et al. 1984)

Tableau 41 : Comparaison de notre estimation du dépôt avec les émissions proposées par différents auteurs pour l'Agung et le Tambora (MT = 10⁶ tonnes). Malgré les difficultés rencontrées pour effectuer ce calcul, nos résultats semblent tout à fait cohérents avec les émissions estimées d'acide sulfurique (voir tableau 41), l'estimation de 2,8 MT par l'Agung semblant toutefois un peu faible.

3.2.4.4. CLASSEMENT DES ERUPTIONS VOLCANIQUES DEPUIS 1760 A PARTIR DE LA MASSE D'ACIDE SULFURIQUE DEPOSEE DANS LA NEIGE

Afin de quantifier l'importance respective des différents événements volcaniques ayant entraîné une retombée significative d'acide sulfurique dans la neige du Dôme C (voir paragraphe 3.2.4.2.), nous avons évalué la masse d'acide sulfurique correspondante déposée dans la neige. Pour chacun des événements, que nous avons pu interpréter (figure 65), le bruit de fond (c_0) a été évalué en faisant une moyenne sur une dizaine d'échantillons choisis autour du pic (figure 77). Dans le cas du pic n° 4 (figure 65), nous avons considéré que ce pic, plus large que les autres (31 cm) devait intégrer en fait les retombées du Krakatoa (1883) et du Tarawera (1886) comme le suggèrent les dates données dans le tableau 30. Le calcul des masses d'acide sulfurique est présenté dans le tableau 42.

Exception faite des éruptions du Galunggung et du Coseguina sur lesquelles nous allons revenir, la masse d'acide sulfurique obtenue est compatible avec le d.v.i. proposé par Lamb (1970). En effet, pour ces sept éruptions, la masse d'acide sulfurique déposée dans la neige est liée au d.v.i. par :

$$\Phi = 0,31 + 0,0054 \text{ (d.v.i.) avec } r = 0,94.$$

Il est intéressant de remarquer (figure 76) que le point figurant l'éruption du Mont Agung est nettement au-dessus de la droite de régression. Ceci confirme bien une surélévation de la masse correspondante déposée en Antarctique suite à la mauvaise répartition en faveur de l'hémisphère Sud, comme la comparaison entre nos résultats et ceux de Hammer l'avait déjà suggéré (voir paragraphe 3.2.4.2.).

Dans le cas de l'éruption du Coseguina, la figure 76 montre que la masse d'acide sulfurique déposée en Antarctique est trop faible pour une éruption de d.v.i. égal à 4000. Le cas d'une éventuelle reprise de la couche de neige correspondante par le vent n'est pas envisageable au vu des résultats obtenus par ailleurs au Pôle Sud (voir figure 67). Nous pouvons envisager deux hypothèses :

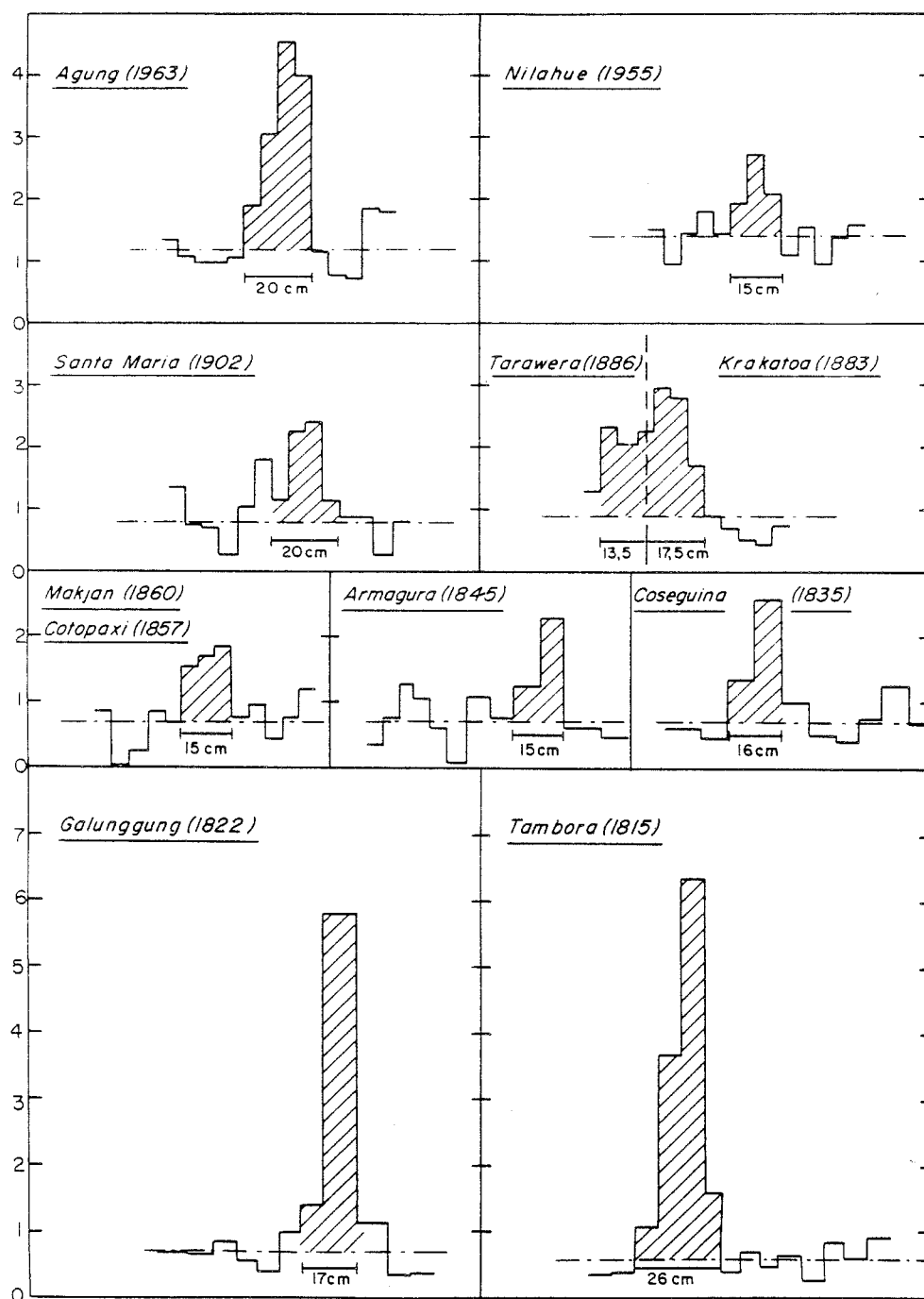


Figure 77 : Signaux volcaniques en H_2SO_4 pour les principaux événements volcaniques enregistrés dans la neige du Dôme C sur les deux cents dernières années.

Evènement	h (m)	ρ_h	$c_o (\mu\text{Eq.l}^{-1})$	Σd_i	$\Phi (\text{kg/km}^2)$
Agung	1,55	0,360	$1,17 \pm 0,39$	20,0	$7,6 \pm 1,3$
Nilahue	2,07	0,370	$1,37 \pm 0,28$	15,0	$2,3 \pm 0,7$
Santa Maria	5,83	0,420	$0,80 \pm 0,34$	20,0	$3,4 \pm 1,2$
Tarawera	7,53	0,442	$0,89 \pm 0,36$	13,5	$3,7 \pm 1,0$
Krakatoa	7,72	0,445	$0,89 \pm 0,36$	17,5	$5,8 \pm 1,3$
Makjan	9,25	0,462	$0,68 \pm 0,35$	15,0	$3,4 \pm 1,2$
Cotopaxi					
Amargura	10,22	0,472	$0,70 \pm 0,36$	15,0	$3,5 \pm 1,2$
Coseguina	10,55	0,477	$0,71 \pm 0,26$	16,0	$4,6 \pm 1,0$
Galunggung	11,54	0,484	$0,72 \pm 0,28$	17,0	$12,9 \pm 1,3$
Tambora	12,00	0,488	$0,57 \pm 0,23$	26,0	$16,8 \pm 1,4$

Tableau 42 : Evaluation de la masse d'acide sulfurique volcanique déposée dans la neige du Dôme C après les différentes éruptions volcaniques.

- soit une très mauvaise répartition des produits soufrés entre les deux hémisphères,
- soit une surestimation générale du d.v.i. (comme le suggèrent Self et al. 1981).

La première hypothèse suggèrerait une répartition privilégiant l'hémisphère nord. Les résultats de Hammer (1980) au Groenland ne confirmant pas cette hypothèse, nous proposons donc à partir de nos résultats un d.v.i. voisin de 1000 pour l'éruption du Coseguina (voir figure 76).

A l'inverse, l'éruption du Galunggung (située en zone équatoriale), a été suivie de retombées d'acide sulfurique très importantes en Antarctique. Pour cette éruption, Lamb (1970) souligne la difficulté de l'estimation du d.v.i. par suite d'une certaine incohérence entre les observations optiques dans l'atmosphère d'une part, le volume de lave et de tephra émis d'autre part. La valeur de 500 est en fait une valeur considérée par Lamb comme minimale. Hammer ne détectant pas cette éruption dans la glace du Groenland, nous ne pouvons pas retenir valablement le d.v.i. de 2500 que suggère la figure 76. Si on se réfère à l'éruption de l'Agung (cas de répartition interhémisphérique déséquilibrée des débris), nous pouvons donc plutôt avancer un d.v.i. voisin de 1100 pour l'éruption du Galunggung (voir figure 76). Une autre interprétation peut aussi être envisagée, celle d'une éruption ayant eu lieu près de l'Antarctique qui n'aurait pas été répertoriée dans les chronologies volcaniques.

CONCLUSIONS

Cette étude a montré que les trois plus grandes éruptions volcaniques survenues dans l'hémisphère Sud au cours des 200 dernières années, à savoir le Mont Agung (1963) le Krakatoa (1883) et le Tambora (1815) sont bien enregistrées dans la neige antarctique. De plus nos résultats mettent en évidence une autre très importante éruption (peut-être du Galunggung en 1822) qui n'apparaissait pas dans les catalogues volcaniques. Par ailleurs, la recherche d'un même événement volcanique en différents sites de l'Antarctique nous a permis d'aborder le mécanisme des retombées d'acide sulfurique volcanique. A partir de ceci, nous avons pu, pour les plus importantes éruptions, proposer une estimation des quantités déposées et de leur répartition interhémisphérique.

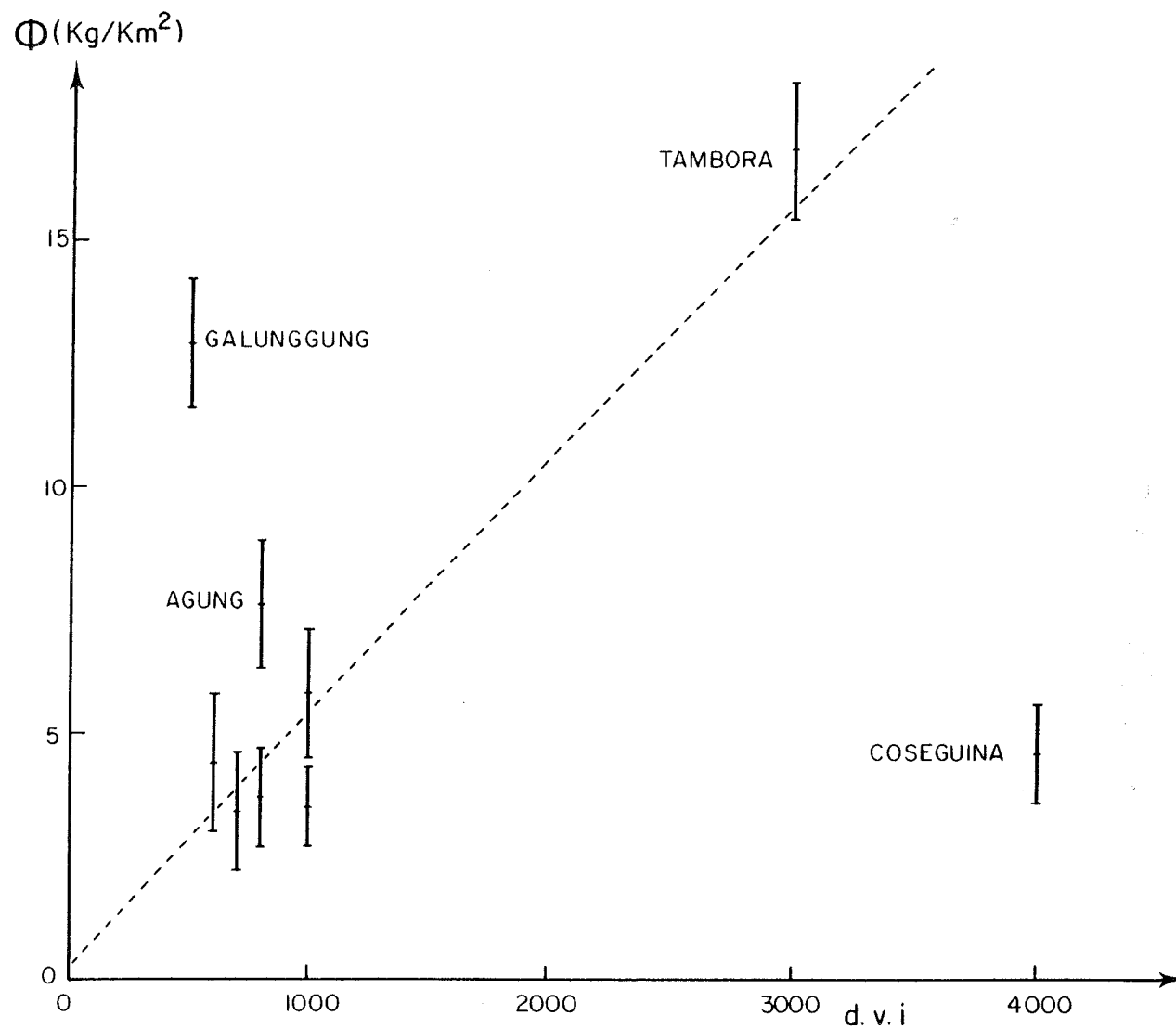


Figure 76 : Relation entre la masse d'acide sulfurique déposée au Dôme C et le d.v.i. correspondant pour les principaux évènements des deux cents dernières années.

4 - VARIATIONS DES TENEURS EN ACIDE NITRIQUE DE LA NEIGE

Rappelons tout d'abord que, comme nous l'avons établi au chapitre 3, la totalité du nitrate présent dans les couches de neige récente est de l'acide nitrique. Il n'en va pas de même pour la glace de la dernière période glaciaire, comme nous le verrons au chapitre 5.

4.1. VARIATIONS SUR LES QUATRE CENTS PREMIERS KILOMETRES DE L'AXE DUMONT D'URVILLE - DOME C

Les teneurs en nitrate obtenues sur la série d'échantillons de surface prélevés entre Dumont d'Urville et la balise D 80 (430 km de la côte) sont présentées figure 51. D'abord voisines de 30 ng.g^{-1} ($32 \pm 16 \text{ ng.g}^{-1}$) dans les deux cents premiers kilomètres, elles semblent augmenter lentement avec la distance à la mer ($59 \pm 21 \text{ ng.g}^{-1}$ entre 200 et 400 km). D'autre part, les flux de retombées annuels (Φ) de nitrate (voir calcul dans le tableau 16, paragraphe 2.2.1.) ne semblent évoluer de manière significative, ni en fonction de l'altitude ($\Phi = 5,8 + 0,0026 h$ avec $r = 0,27$), ni en fonction du taux d'accumulation annuel a ($\Phi = 7,0 + 0,143 a$ avec $r = 0,28$) (voir figure 78).

4.2. ETUDE DE LA NEIGE DEPOSEE A D 55, D 80, DOME C ET POLE SUD SUR LA PERIODE (1959-1969); A DOME C, VOSTOK, D 10 ET BYRD DURANT LA PERIODE HOLOCENE

Les profils de concentration en nitrate pour la période récente sont présentés respectivement sur les figures 53 (D 55), 54 (D 80), 40 (Dôme C) et 55 (Pôle Sud). Les flux de retombées moyens correspondant à cette période sont présentés dans le tableau 43. La figure 79 confirme bien l'observation précédente, à savoir qu'aucune tendance n'apparaît clairement pour les variations du flux de retombées ni avec l'altitude ni avec le taux d'accumulation.

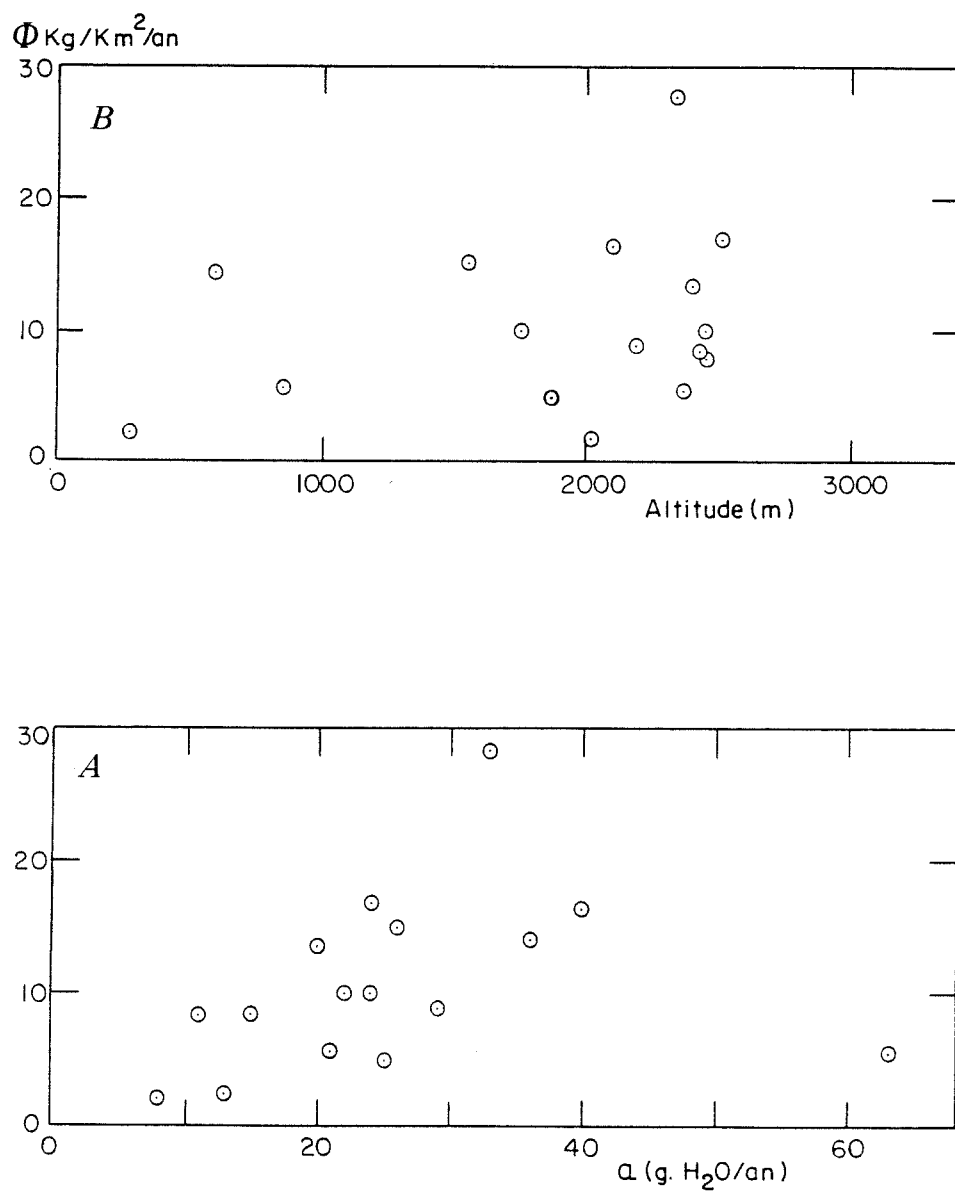


Figure 78 : Evolution du flux de retombées annuel de nitrate en Terre Adélie en fonction du taux d'accumulation (A), de l'altitude du site (B).

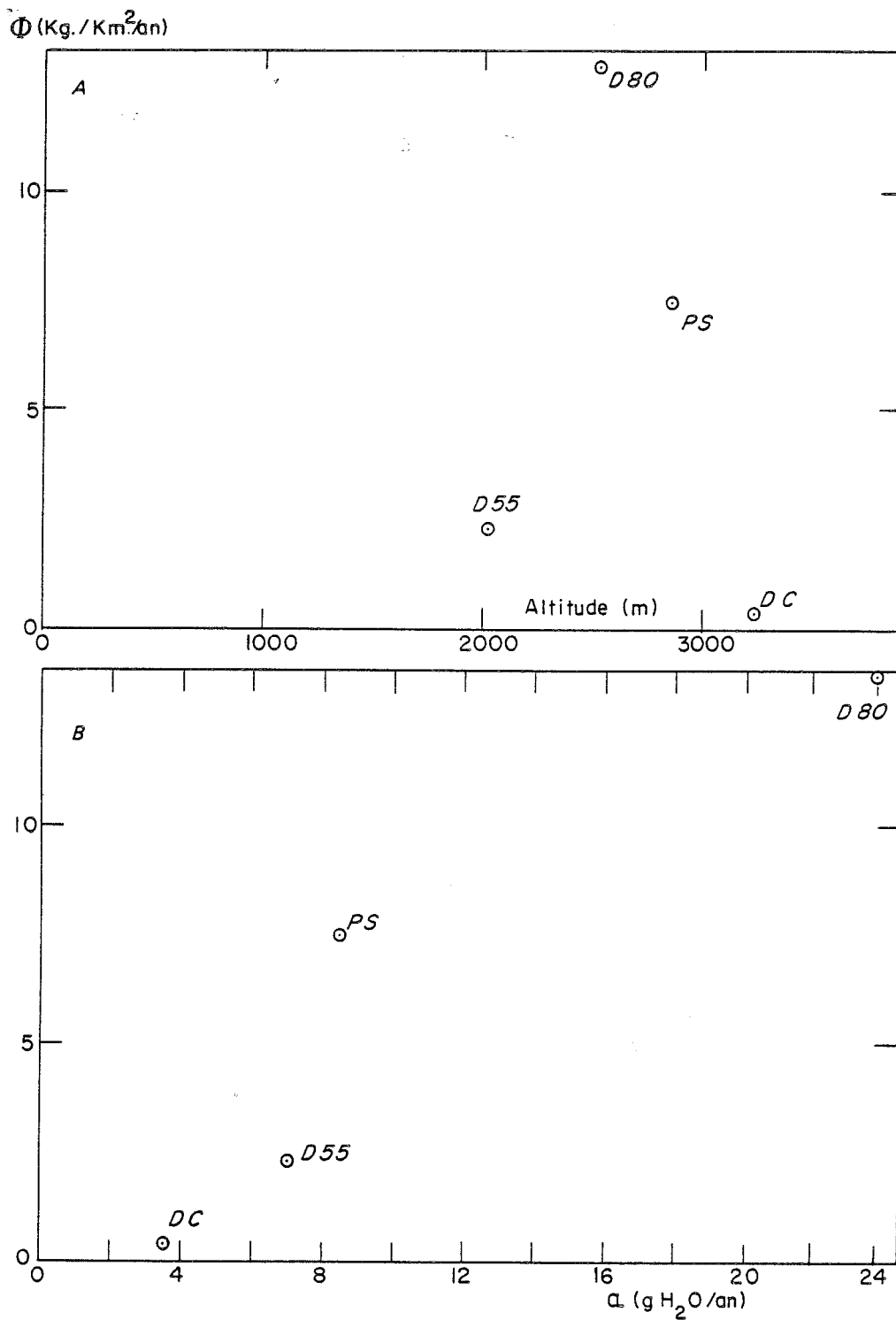


Figure 79 : Variations du flux de retombées moyen annuel de nitrate entre 1959 et 1969 pour différents sites de l'Antarctique de l'Est, en fonction de l'altitude et du taux d'accumulation.

Dans une étude antérieure, Herron (1982) avait montré que la concentration en nitrate dans la neige de l'Antarctique et du Groënland décroissait avec le taux d'accumulation en suivant une loi exponentielle, la teneur très faible observée à Vostok ne suivant toutefois pas cette loi. Nos résultats obtenus sur la période holocène (tableau 44) concordent bien avec ceux obtenus par Herron à la station Vostok. En effet, nous obtenons pour ce site une teneur et un flux de retombée très faibles sans que cela soit cependant une caractéristique de ce site, puisque la teneur observée au Dôme C est également très faible (figure 80).

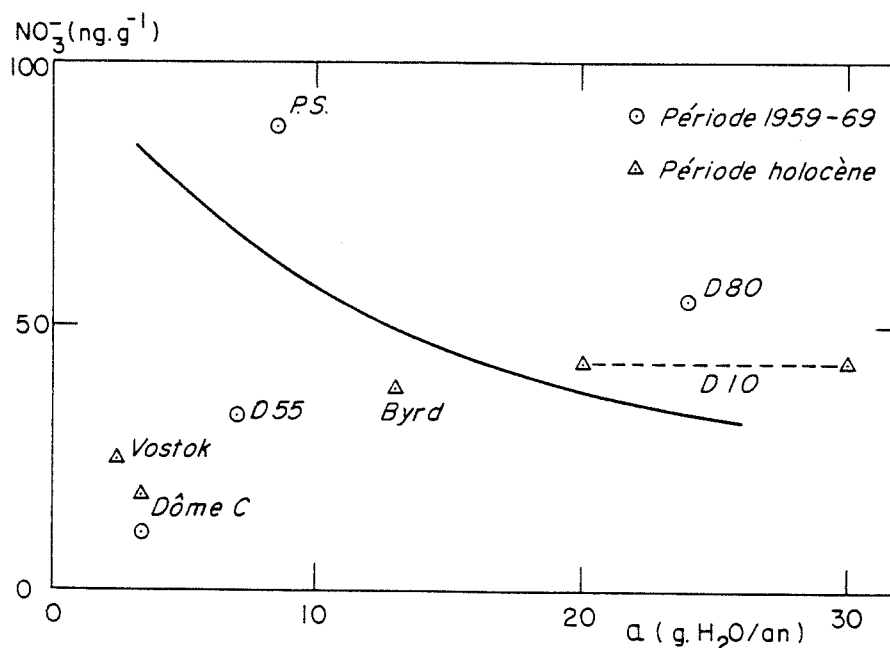


Figure 80 : Concentration de NO_3^- en fonction du taux d'accumulation, la courbe de Herron (1982) est portée en trait plein.

Par contre nos résultats (figure 80) ne confirment pas la décroissance des concentrations avec le taux d'accumulation suggérée par Herron 1982.

Le flux de retombée d'acide nitrique augmente avec le taux d'accumulation, mais nous pouvons observer (figure 79), contrairement au cas du sel de mer (voir paragraphe 2.2.2) et de l'acide sulfurique (paragraphe 3.1.1.2) une forte dispersion des résultats. Cette comparaison suggère que la variabilité du dépôt observé dans le cas d' HNO_3 n'est pas due à des erreurs au niveau de l'évaluation du flux ou du taux d'accumulation mais reflète bien une inhomogénéité des retombées de ce composé à l'échelle du continent antarctique. De même la comparaison des concentrations entre D 55 et le Pôle Sud (respectivement 33 et 88 ng.g⁻¹), sites dont le taux d'accumulation reste

voisin sur la période 1959-1969, met clairement en évidence la forte variabilité géographique des retombées de HNO_3 . Bien que la couverture géographique présentée dans ce travail soit ici insuffisante, il semble que les retombées de nitrate soient particulièrement faibles sur le haut plateau de l'Antarctique de l'Est. En dehors de cette zone, les dépôts semblent plus importants vers l'intérieur du continent qu'en zones côtières. La variation géographique du dépôt peut être le reflet d'une variabilité géographique de la teneur en HNO_3 de l'atmosphère antarctique ou encore d'une retombée différente de ce composé d'un site à l'autre. Il nous faut ici, tout comme pour le cas de l'acide chlorhydrique (voir 2.4.3.3.), souligner la nature gazeuse de ce composé dans l'atmosphère antarctique.

Les seules données disponibles à ce jour, concernant la concentration en acide nitrique de l'atmosphère antarctique, se limitent à une étude (d'ailleurs très ponctuelle dans le temps) réalisée par Williams et al. 1982. Ces auteurs observent de fortes variations des teneurs en fonction de la latitude, en particulier, une augmentation entre Mac Murdo (voir figure 17) et le Pôle Sud où la teneur est la plus élevée. Ainsi la variabilité géographique observée dans la neige semble, tout au moins partiellement, être le reflet de l'atmosphère.

Sites	NO_3^- (ng.g ⁻¹)	Altitude (m)	Distance à la mer (m)	a (g H ₂ O/an)	Φ (kg/km ² /an)
D 55	33	2028	180	7,0	2,3
D 80	55	2524	430	23,7	13,1
Dôme C	10,5	3240	1070	3,4	0,36
Pôle Sud	88	2850	1274	8,5	7,5

Tableau 43 : Flux de retombées moyen annuel de HNO_3 pendant la période 1959-1969 en différents sites de l'Antarctique de l'Est.

Sites	NO_3^- (ng.g ⁻¹)	Altitude (m)	Distance à la mer (m)	a (g H ₂ O/an)	Φ (kg/km ² /an)
D 10	43	?	?	20-30	8,5 - 12,9
Byrd	38	1530	670	13	4,9
Dôme C	18	3240	1070	3,4	0,65
Vostok	25	3490	1294	2,2	0,55

Tableau 44 : Flux de retombées moyen annuel de HNO_3 pendant la période holocène à D 10, Byrd, Dôme C et Vostok.

4.3. VARIATIONS SAISONNIERES AU POLE SUD

Nous avons étudié les variations saisonnières de la teneur en nitrate de la neige déposée au Pôle Sud entre 1949 et 1953 (figure 58) d'une part, entre 1959 et 1969 (figure 55) d'autre part. Le signal saisonnier moyen (figure 45) montre que la teneur en nitrate de la neige devient maximale en été (janvier-février). Notons que l'amplitude de ces variations reste faible comme l'indique le rapport des concentrations entre l'été et l'hiver (1,2 pour chacune des deux périodes étudiées).

Parker et Zeller 1980 mettent également en évidence des variations saisonnières de la teneur en nitrate de la neige au Pôle Sud (période 1962-1979) mais observent des teneurs maximales en hiver (juin à octobre), minimales en été (décembre-janvier). Dans une autre étude, Herron (1982') a étudié les variations dans la neige du Pôle Sud sur la période 1923 à 1936. Le profil obtenu fait apparaître des maxima en été mais la faible amplitude observée ne permet néanmoins pas d'identifier toutes les années, contrairement à ce qui est trouvé au Groënland (Herron 1982, Hammer et al. 1980).

Ce phénomène est sûrement lié à une importante redistribution des couches de neige durant cette période comme le suggèrent les variations de la teneur en sodium également plus faibles que celles que nous avons obtenues sur la période récente (1949-1953 et 1959-1969). Il semble donc bien que les résultats de Parker et Zeller déjà contestés par d'autres (Herron 1982, Legrand et Delmas 1984) ne soient pas corrects. Les origines possibles de ces variations saisonnières seront discutées ultérieurement (paragraphe 4.6.).

4.4. MODULATION EVENTUELLE DES TENEURS EN NITRATE DE LA NEIGE PAR LES CYCLES SOLAIRES

De nombreuses publications, toutes des mêmes auteurs, font état d'une modulation par l'activité solaire des retombées de nitrate dans la neige antarctique (Parker et Zeller 1980, Parker et Zeller 1980', Parker et al. 1977, Laird et al. 1982). Mais cette relation, pas encore définitivement prouvée, est fortement contestée par d'autres auteurs (Herron 1982, Legrand et Delmas 1984).

Pour la neige déposée entre 1959 et 1969 au Pôle Sud, nous avons moyenné les concentrations de nitrate année par année. Le profil ainsi obtenu (figure 81) ne met en évidence aucune modification de la teneur en nitrate de la neige durant les périodes de forte activité solaire (les années 1958-1959 d'une part, 1968 à 1970 d'autre part). Dans une étude portant sur la neige déposée entre 1956 et 1978 au Pôle Sud, Parker et Zeller (1980) établissent une corrélation non pas avec les concentrations de nitrate mais en fait avec les flux de retombée annuels. Ces auteurs argumentent ce calcul en faisant observer que le taux d'accumulation de neige au Pôle Sud semble être plus important durant les périodes d'activité solaire intense. Nous avons ici la chance de disposer de l'épaisseur annuelle des couches de neige qui correspondent exactement à notre échantillonnage. Nous avons donc effectué un calcul similaire à partir des teneurs moyennes en nitrate observées chaque année et du taux d'accumulation correspondant. Nous pouvons observer (tableau 45) que le taux d'accumulation est assez élevé en 1959 mais au contraire faible en 1960 (respectivement 14 et 5 g H_2O /an à comparer aux 8,5 g H_2O /an obtenus en moyenne en ce site.) Par ailleurs, durant les années 1968-1969, années de forte activité solaire, le taux

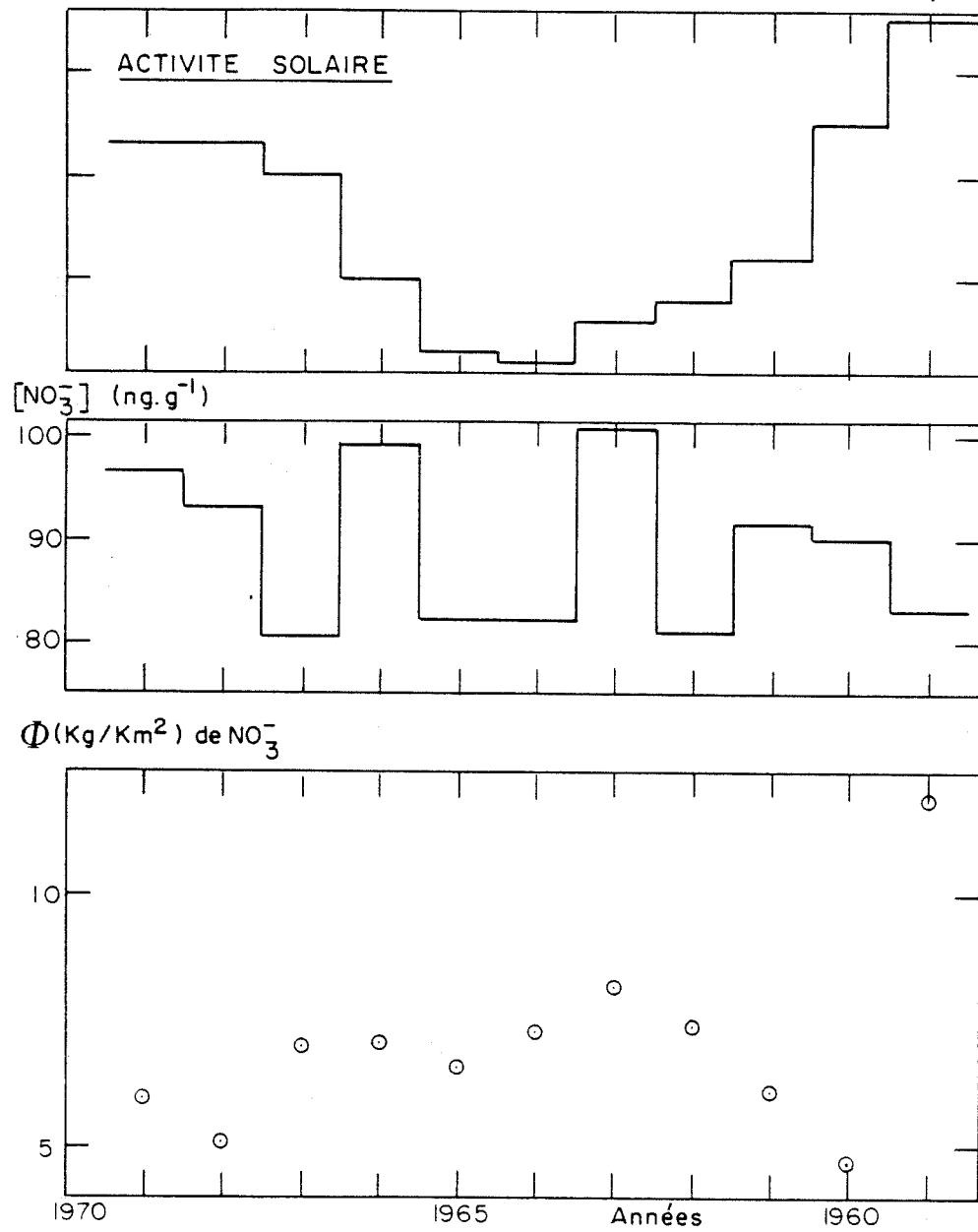


Figure 81 : Variations des concentrations et des flux de retombées de nitrate, au Pôle Sud, en fonction du cycle solaire (période 1959-1969).

Année	Concentration moyenne (ng.g ⁻¹)	Accumulation (g H ₂ O/an)	Φ (kg/km ²)
1959	83,1	14,0	11,9
1960	89,9	5,0	4,5
1961	91,5	6,6	6,1
1962	80,8	9,1	7,4
1963	100,7	8,2	8,2
1964	81,8	8,9	7,3
1965	81,8	8,0	6,6
1966	98,9	7,2	7,1
1967	81,0	8,7	7,0
1968	93,0	5,5	5,1
1969	96,5	6,2	6,0

Tableau 45 : Concentration et flux de retombées de nitrate en fonction du temps au Pôle Sud entre 1959 et 1969. Les accumulations annuelles sont de Jouzel et al. 1983.

d'accumulation annuel de neige reste inchangé (tableau 45). Il apparaît donc que la corrélation entre l'activité solaire et le taux d'accumulation annuel de la neige suggérée par Parker et Zeller ne soit qu'une coïncidence. Les flux de retombées, tout comme les concentrations ne révèlent pas de modification des retombées de nitrate dans la neige du Pôles Sud, en liaison avec l'activité solaire (figure 81).

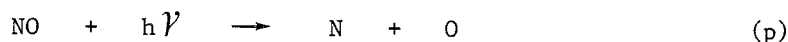
Il est difficile de conclure définitivement sur ce problème à l'aide de nos seuls résultats, car ceux-ci ne portent que sur un cycle de 11 ans. D'autre part, il n'est guère possible d'analyser plus en détail les résultats de Parker et Zeller qui, dans leurs travaux, présentent directement les courbes de flux de retombées sans fournir de détails. Notons cependant que le profil de concentration en nitrate obtenu par Herron 1982, toujours au Pôles Sud, mais sur la période 1925-1936, ne fait apparaître aucune variation avec l'activité solaire. Dans une autre étude portant cette fois sur la neige du Groënland, Herron 1982 aboutit à la même conclusion.

Par ailleurs, l'existence même d'une modulation du flux "stratosphère-troposphère" de NO n'est pas prouvée du tout au vu des connaissances actuelles sur la production dans la haute atmosphère. En effet au-dessus de la tropopause, les oxydes d'azote sont générés par différents mécanismes. Dans la stratosphère, la principale source est l'oxydation de N_2O ($4,5 \cdot 10^{34}$ molécules de NO par an dont $1,4 \cdot 10^{33}$ aux hautes latitudes : Johnston et al. 1979) suivant la réaction :



La quantité d'oxygène atomique nécessaire à cette réaction dépendant de la concentration d'ozone (O_3), le taux de production de NO devrait varier avec le cycle solaire. Cette éventualité fait encore actuellement l'objet de nombreuses controverses. Le rayonnement galactique (G.C.R.) et de manière ponctuelle les protons solaires (S.P.E.) représentent les deux autres sources potentielles de NO dans la stratosphère (G.C.R. : $1,1$ à $1,6 \cdot 10^{33}$ molécules de NO par an, Jackman et al. 1980 ; S.P.E. : 0 à $2,5 \cdot 10^{33}$, Crutzen et al. 1975). Notons que si la production ponctuelle par les protons solaires est en général en phase avec le cycle solaire, la production par le rayonnement galactique est au contraire en opposition de phase avec le cycle. Les deux mécanismes continus de production

de NO dans la stratosphère (oxydation de N_2O et G.C.R.) semblent donc être de même importance pour les hautes latitudes mais sont en opposition de phase l'une par rapport à l'autre. Il est donc légitime de penser que la production globale de NO dans la stratosphère ne sera que peu modulée par le cycle solaire. A côté de ces trois mécanismes qui intéressent la stratosphère, le rayonnement ultraviolet ionisant et l'activité aurorale produisent respectivement 90 à 180 10^{35} et 9 10^{35} molécules de NO par an dans l'ionosphère (Crutzen 1979). Mais dans cette partie de la haute atmosphère ces molécules vont subir une intense destruction par les réactions (p) et (q) et de ce fait ne devraient pas modifier notablement le budget de la basse stratosphère (Jackman et al. 1980).

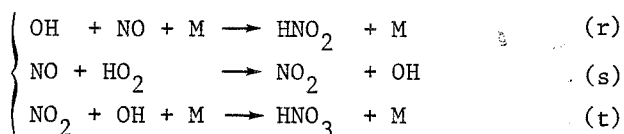


L'ensemble de ces considérations ne suggèrent pas clairement que le flux global de NO atteignant la troposphère soit modulé par le cycle solaire.

En définitive il apparaît que l'hypothèse d'un enregistrement de l'activité solaire dans les neiges polaires n'est appuyée ni par nos résultats expérimentaux ni d'ailleurs par la chimie stratosphérique.

4.5. AUTRES PHENOMENES ATMOSPHERIQUES POUVANT INFLUENCER LA TENEUR EN NITRATE DE LA NEIGE

Plusieurs types d'accidents atmosphériques peuvent affecter la teneur en oxyde d'azote de la haute ou moyenne atmosphère. Nous allons essayer de les passer en revue succinctement. Il a été en particulier suggéré que les tests nucléaires effectués dans l'atmosphère pouvaient entraîner la formation de quantités importantes d'oxydes d'azote dans la stratosphère. Ainsi, Bauer et Gilmore (1975) estiment que l'importante série de tests de 1961-1962 a introduit 1,5 MT de NO dans la stratosphère. Pour l'essentiel, ce monoxyde d'azote (NO) est ensuite détruit après diffusion dans la troposphère suivant les réactions :



Les débris radioactifs émis lors de ces tests sont retombés en Antarctique entre 1964 et 1966. Il est clair que les profils de teneur en nitrate obtenus sur la période 1959-1969 à D 55 (figure 53), D 80 (figure 54), Dôme C (figure 40) et au Pôle Sud (figure 55) ne montrent pas d'augmentation durant les années 1964 à 1966.

Lors de sa chute en Sibérie au mois de juin 1908, la très grosse météorite Tunguska a, en pénétrant dans l'atmosphère terrestre, pu générer des quantités très importantes d'oxyde d'azote (NO). Park 1978 estime à 30 MT la quantité globale de NO produite entre 10 et 100 km d'altitude. Turco et al. 1982 estiment à 9 MT/an la quantité de NO diffusant dans la troposphère et ceci pendant 3 ans. Ce flux de NO dans la troposphère (9 MT de NO, soit 18 MT de HNO_3) est six fois plus important que le flux de NO (1,5 MT, soit 3 MT de HNO_3) correspondant aux tests nucléaires atmosphériques de 1961-1962. Le profil de la teneur en nitrate de la neige déposée au Dôme C entre 1870 et 1980 (figure 48) ne montre aucune modification significative à la profondeur correspondant aux années 1908 à 1912 (6 mètres de profondeur par rapport à la surface 1980, voir paragraphe 3.2.3.1.). L'étude de la conductivité liquide réalisée sur le forage PS2 au Pôle Sud (voir figure 67) conduit à la même conclusion; en effet, si les retombées de la Tunguska contribuaient de manière significative à la teneur en acide nitrique de la neige, nous aurions dû observer une augmentation de ce paramètre à 11,80 mètres de profondeur (datation obtenue d'après le tableau 33, paragraphe 32331., chapitre 4).

Nos résultats démontrent que ces deux sources exceptionnelles d'acide nitrique (tests nucléaires et Tunguska) n'influent pas sur les teneurs dans les neiges antarctiques, ce qui suggère soit que les calculs ont surestimé leur importance, soit que l'effet des retombées a été circonscrit à l'Hémisphère Nord. Ces conclusions sont en accord avec une étude antérieure de Rasmussen et al. 1984. En effet ces auteurs ne constatent aucune variation de teneurs en NO_3 dans la neige du Groënland, après l'évènement Tunguska et suggèrent que l'estimation de Turco et al. 1982 est erronée de 1 ou 2 ordres de grandeur.

Enfin, l'explosion des supernovae a également été suggérée comme cause possible de la formation d'acide nitrique dans la haute atmosphère.

Les périodes de temps couvertes par nos échantillonnages ne sont pas adéquates. Par contre, nous avons pu aborder ce problème dans une autre étude de la neige à D 57 (Zanolini et al. 1985). Nous ne le discuterons pas davantage ici. Pour plus de détails, le lecteur voudra bien se reporter aux articles de Herron (1982); Parker et al. 1982 ; Zanolini, Delmas and Legrand (in press); Risbo, Clausen et Rasmussen (1981).

4.6. DISCUSSION

Comme nous venons de le voir dans les deux paragraphes précédents, de nombreuses hypothèses sont souvent invoquées pour expliquer les fluctuations de la teneur en nitrate de la neige antarctique (cycles solaires, tests nucléaires, événement Tunguska, supernovae...). Mais l'origine même du bruit de fond de nitrate en régions polaires reste très mal définie (Herron, 1982 ; Legrand and Delmas, 1984).

Il est maintenant bien établi que la présence de HNO_3 dans la troposphère est essentiellement le résultat de la conversion des oxydes d'azote NO et NO_2 . Malheureusement leurs sources, puits et transports sont encore mal connus !

La conversion des oxydes d'azote en acide nitrique dans la troposphère est rapide, de l'ordre de 1 ou 2 jours (Logan, 1981 ; Liu et al., 1983). A l'inverse, le temps de résidence de l'acide nitrique est encore très controversé. Il semble néanmoins bien admis que vu sa grande solubilité dans l'eau, ce gaz demeure plus longtemps dans la moyenne et haute troposphères que dans les basses couches de l'atmosphère.

Plusieurs processus naturels et anthropogéniques sont générateurs d'oxyde d'azote (voir tableau 46). Exception faite des deux premières (transfert stratosphère - troposphère et éclairs), les autres sources émettent à partir de la surface des continents. Parmi ces dernières, les feux de forêts représentent une contribution importante. Cependant le chiffre de 50 MT (tableau 46) prend en considération les NO_x mais aussi le protoxyde d'azote (N_2O), composé très stable dans la troposphère et qui n'est pas un précurseur de HNO_3 . Par ailleurs, il faut noter qu'une part importante des feux de forêts est due en fait à l'action de l'homme.

L'activité humaine (combustion des énergies fossiles, influence sur la biomasse) représente globalement une source potentielle importante de NO_x . Les teneurs en nitrate obtenues au Dôme C sur les 250 dernières années (figure 97) ne révèlent aucune tendance liée à l'influence de l'homme. Les teneurs qui évoluent entre 10 et 20 ppb (figure 97) sont stables depuis près de 8000 ans (voir figure 85, chapitre 5). Ce résultat suggère que, contrairement à ce qui est observé au Groënland, l'activité humaine n'a pas encore modifié le budget de l'acide nitrique aux hautes latitudes de l'Hémisphère Sud. Cette conclusion semble raisonnable concernant la production de NO_x à partir de l'énergie fossile, car 90 % de ces émissions sont concentrées dans l'Hémisphère Nord. La combustion de la biomasse, qui concerne de manière plus équilibrée les deux hémisphères, avait plus de chance de concerner les hautes latitudes car elle génère des NO_x à des altitudes plus élevées dans la troposphère libre que la source précédente.

Les NO_x naturels émis depuis la surface des continents (feux de forêts naturels, oxydation de NH_3 et dénitrification des sols), suite à une forte reprise par les précipitations dans les basses couches de l'atmosphère, ont peu de chance d'atteindre la moyenne et haute troposphères et de gagner ainsi les hautes latitudes. D'ailleurs si tel était le cas, la répartition hémisphérique des continents et leurs positions par rapport aux pôles favoriseraient nettement le Groënland. En admettant le Groënland comme bien représenté par les stations North Central, Camp Century, Dye 3 et Crête, l'Antarctique par Dôme C, Byrd, Pôle Sud, D 55 et D 80, nous obtenons une valeur moyenne de 60 ng.g^{-1} pour le Groënland (Herron, 1982) (les échantillons considérés étant libres de toute contribution anthropogénique). Cette valeur reste très voisine de celle obtenue en Antarctique (15 à $90 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$).

Les conclusions précédentes suggèrent que les deux sources possibles d'acide nitrique dans les régions polaires sont d'une part le transfert de composés de l'azote de la stratosphère vers la troposphère, d'autre part des oxydes d'azote produits par les éclairs. Malheureusement, les éclairs représentent la source d'oxyde d'azote la plus mal quantifiée (voir tableau 26). Dans une étude portant sur la distribution des NO_x dans la troposphère en région d'air propre, Kley et al. 1981 négligent la contribution des éclairs en estimant que l'essentiel des produits formés sont lavés localement par les précipitations.

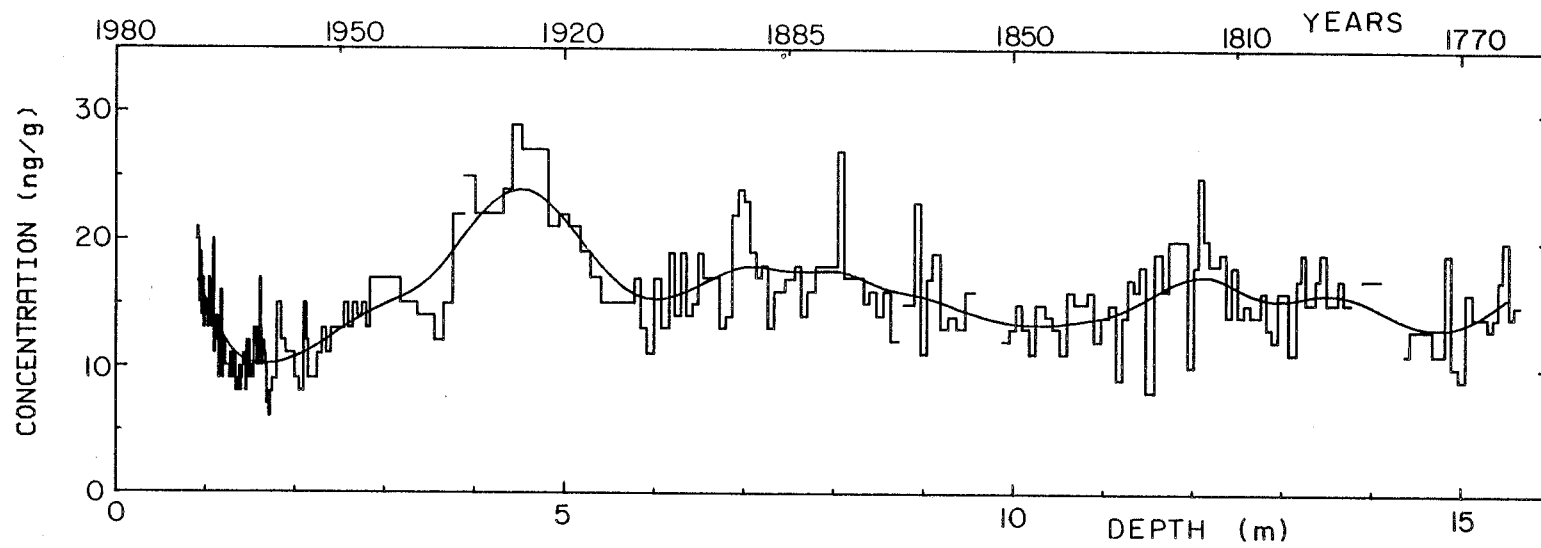


Figure 97: Teneurs en nitrate sur les 200 dernières années au Dôme C .

Un lissage par fonction spline ($\rho=0,01$) montre la tendance.

Kowalczyk and Bauer (1982) estiment au contraire que les éclairs produisent des quantités significatives de NO dans la haute troposphère, l'acide nitrique ainsi formé n'étant plus repris par les précipitations; il pourra alors être transporté sur de longues distances.

Source de NO, NO ₂	Estimation (MT de N/an)	Références
Retombées provenant de la stratosphère	0,5 - 1,0	Levy et al. 1980
Eclairs	4 40 0,8 - 8	Tuck 1976, Dawson 1980, Hill et al. 1980 Chameides et al. 1977 Borucki et Chameides, 1984
Source anthropogénique	20	Soderlund et Svensson 1976
Feux de forêts	50	Crutzen et al. 1979
Oxydation de NH ₃	1 - 10	Logan et al. 1981
Dénitrification des sols	1 - 10	Galbally and Roy 1978

Tableau 46 : Estimation des différentes sources de NO et NO₂ pour la troposphère.

La figure 79 nous permet d'estimer très grossièrement que le flux de retombée moyen de nitrate en Antarctique est de l'ordre de 10 kg/km²/an. Si l'on se réfère aux retombées d'acide sulfurique occasionnées par l'éruption de l'Agung et en utilisant un calcul similaire à celui présenté au paragraphe 3.1.4, le transfert stratosphère-troposphère quant à lui devrait entraîner une retombée d'environ 1 à 2 kg/km²/an d'acide nitrique dans la neige du Pôle Sud (voir tableau 47).

Fonction source (H.S.) MT	Retombée moyenne au Pôle Sud (kg/km ²)
Agung : 12 (H ₂ SO ₄) (2 ans)	11,1 (H ₂ SO ₄) (2 ans)
Transfert stratosphère- troposphère (par an) 0,25-0,50 (N) soit 1 - 2 HNO ₃	1 - 2 (HNO ₃) (par an)

Tableau 47 : Evaluation du flux de retombée annuel moyen d'acide nitrique dû à l'injection stratosphérique.

Il apparaît donc que le transfert stratosphère-troposphère n'est pas suffisant à lui seul pour expliquer toute la retombée d'acide nitrique dans la neige du Pôle Sud un excès moyen de 6 kg/km²/an restant à expliquer. Les considérations précédentes concernant les sources et le transport suggèrent que la formation d'oxydes d'azote dans les orages, associée à un transport longue distance de l'acide nitrique rapidement formé, pourraient permettre de rendre compte de cet excès. Si l'on reprend la production la plus couramment avancée actuellement pour les éclairs (4,6 MT de N : Borucki et Chameides) et en admettant tout d'abord une retombée homogène des produits, nous obtenons une valeur d'environ 40 kg/km²/an (à comparer aux 6 kg/km²/an manquants). L'écart de 6 à 40 kg/km²/an peut aisément s'expliquer par une retombée non homogène en fonction de la latitude favorisant la zone équatoriale comme cela est suggéré par Hameed et al. 1981. Ainsi, il semble raisonnable d'avancer que l'acide nitrique présent dans la neige antarctique pourrait provenir à la fois de la stratosphère et des éclairs, la contribution de ces deux sources étant de 20% et 80% respectivement. L'étude de Hameed et al. 1981 suggérerait plutôt une contribution équivalente des deux sources au Pôle Sud, mais il faut noter que ces auteurs ont utilisé un taux de production de 2 MT/an (N) pour les éclairs, ce qui semble être plutôt sous-estimé au vu des dernières évaluations (Borucki et Chameides, 1984).

Pour expliquer la variabilité géographique des teneurs en acide nitrique de la neige, plusieurs hypothèses peuvent être envisagées. L'existence d'une source locale pourrait éventuellement rendre compte de cette variabilité. Cette hypothèse n'est cependant pas réaliste puisque la seule source à caractère local est l'océan qui ne peut être considéré comme une source importante d'émission d'oxydes d'azote (Graedel 1979). Les mécanismes de retombées de l'acide nitrique dans la neige peuvent tout au moins partiellement (voir paragraphe 4.2.) influencer sur les variations de retombées observées dans la neige. L'étude des flux de retombées en fonction de l'altitude et du taux d'accumulation, du fait que les concentrations dans l'air ne sont pas homogènes (Williams et al. 1982) n'a pas apporté d'informations sur les mécanismes. Par contre, l'étude du flux de retombées au Pôle Sud en fonction du temps (voir tableau 45), qui permet de s'affranchir du paramètre géographique, montre que le flux est linéairement dépendant du taux d'accumulation ($\Phi = 0,94 + 0,76 a$ avec $r = 0,96$). Cette équation suggère un dépôt sec ne dépassant guère 16% de la retombée totale au Pôle Sud. Cette observation ne portant que sur un site ne peut cependant pas être généralisée et beaucoup reste à faire sur ce problème des mécanismes de retombées de l'acide nitrique en régions polaires.

Pour expliquer les variations géographiques observées, nous suggérons donc l'hypothèse d'un transport longue distance privilégiant les zones de l'Antarctique comprises entre 2500 et 3000 m d'altitude environ.

Enfin, les faibles variations saisonnières observées dans la neige au Pôle Sud peuvent s'expliquer par l'origine double du nitrate. En effet, le transfert stratosphère-troposphère se fait préférentiellement en été sur l'Antarctique tandis que la pénétration de matière venant des basses et moyennes latitudes est maximale en hiver.

5 - COMPOSITION CHIMIQUE DE LA PRECIPITATION ANTARCTIQUE

5.1. CONTRIBUTIONS RELATIVES DE L'AEROSOL PRIMAIRE ET DE L'AEROSOL SECONDAIRE

Les prélèvements de surface réalisés sur les 400 premiers kilomètres de l'axe Dumont d'Urville-Dôme C démontrent une très rapide décroissance de la teneur en sel de mer de la neige avec l'altitude. Au-delà de cette zone située très près de la côte, la neige contient alors des impuretés essentiellement dérivées de gaz atmosphériques (NO_x , SO_2 , NH_3 et HCl). Afin de comparer de manière plus précise l'importance relative des impuretés provenant de l'aérosol primaire (embruns marins) et de l'aérosol secondaire (conversion gaz-particules) dans la neige, nous avons tout d'abord étudié la neige des régions côtières. Pour cela, nous disposons d'une part des prélèvements de surface effectués dans les tout premiers kilomètres du raid (balises D10, D 24 et D 40) d'une part de la partie haute (0 à 100 m de profondeur) d'un forage réalisé à D 10 (voir paragraphe 4.4., chapitre 2). Ces deux séries d'échantillons peuvent être considérées comme bien représentatives de la neige des régions côtières. A partir de la composition chimique de la partie soluble des impuretés contenues dans ces échantillons (présentée dans le tableau 48), nous avons calculé que le sel de mer (Na^+ , Cl^- , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ et une partie du sulfate égale à 0,121 $[\text{Na}^+]$, voir chapitre 3) représentait 84 à 89% de la charge ionique totale (Σ). De la même manière (tableau 49), nous avons évalué la contribution du sel de mer en différentes stations du plateau antarctique. Pour certaines d'entre elles, comme nous l'avons vu au paragraphe 2, le rapport Cl/Na est supérieur au rapport de l'eau de mer (1,17 en $\mu\text{Eq.l}^{-1}$, voir tableau 7). Le sel de mer est dans ce cas évalué comme la somme de $[\text{Na}^+]$, Mg^{++} , Ca^{++} , K^+ et des parties de chlore et de sulfate égales respectivement à 1,16 $[\text{Na}^+]$ et 0,121 $[\text{Na}^+]$ (voir paragraphe 4.3., chapitre 3). La contribution du sel de mer pour ces différentes stations (tableau 50) devient beaucoup plus faible (26% en moyenne) qu'en zones côtières. Ainsi, il apparaît que dès que l'on quitte la zone côtière, l'essentiel des impuretés solubles est représenté par la fraction provenant de l'aérosol secondaire (Legrand and Delmas, in press).

Origine et nombre de points	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	K ⁺	Cl ⁻ sel de mer excès	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻ sel de mer excès	H ⁺	NH ₄ ⁺	Σ
0-100 mètres (forage D 10) (8 points)	8,3 ± 4,6 (34%)	1,9 ± 1,1 (8%)	0,4 ± 0,2 (2%)	0,2 ± 0,1 (1%)	9,9 ± 5,3 (40%)	N ± 0,2 (2%)	1,00 0,69 (4%) (3%)	1,3 ± 0,5 (5%)	0,1 ± 0,2 (<1%)	24,3
Prélèvements en Terre Adélie (D10, D24, D40)	5,3 ± 4,5 (33%)	1,2 ± 1,0 (7%)	0,2 ± 0,2 (1%)	0,1 ± 0,1 (1%)	6,1 ± 5,3 (38%)	N ± 0,2 (2%)	0,64 0,72 (4%) (5%)	1,4 ± 0,7 (9%)	0,2 ± 0,0 (1%)	16,1

Tableau 48 : Concentrations moyennes en ions majeurs (en $\mu\text{Eq.l}^{-1}$) sur les échantillons correspondant au haut du forage D10, sur les échantillons de surface prélevés entre la côte et 33 km de la mer (N : négligeable).

Site étudié (nombre de points)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	K ⁺	Cl ⁻ sel de mer excès		NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻ sel de mer excès		H ⁺	NH ₄ ⁺	Σ
D 55 (68)	0,60 ± 0,53 (13%)	0,14 ± 0,12 (3%)	ND	0,02 ± 0,01 (<1%)	0,070 ± 0,56 (15%)	N N	0,53 ± 0,21 (11%)	0,07 (2%)	0,99 (21%)	1,4* (30%)	0,17 ± 0,06 (4%)	4,6
D 80 (37)	0,46 ± 0,39 (9 %)	0,11 ± 0,09 (2%)	ND	0,01 ± 0,01 (<1%)	0,54 (11%)	0,16 (3%)	0,87 ± 0,27 (18%)	0,06 (1%)	0,69 (14%)	1,92 ± 0,57 (39%)	0,06 ± 0,04 (1%)	4,9
Dôme C (80)	0,96 ± 0,39 (12%)	0,22 ± 0,09 (3 %)	ND	0,06 ± 0,03 (1%)	1,12 (14%)	0,81 (10%)	0,17 ± 0,03 (2%)	0,12 (2%)	1,86 (23%)	2,54 ± 1,18 (32%)	0,13 ± 0,04 (2%)	8,0
Pôle Sud (90)	0,64 ± 0,25 (7 %)	0,15 ± 0,06 (2 %)	ND	0,03 ± 0,01 (<1%)	0,75 (9%)	0,52 (6%)	1,42 ± 0,20 (17%)	0,08 (1%)	1,46 (17%)	3,39 ± 0,98 (39%)	0,15 ± 0,09 (2%)	8,6

Tableau 49 : Concentrations moyennes en $\mu\text{Eq.l}^{-1}$ et répartition (en %) pour les ions majeurs dans la neige (1959 à 1969) en différents sites de l'Antarctique de l'Est, (ND : non déterminé, N : négligeable). L'astérisque rappelle que la valeur d'acidité donnée ici n'est pas la valeur expérimentale, mais la valeur déduite de l'équilibre ionique entre cations et anions à D 55 (voir paragraphe 4.1., chapitre 3).

Station	Sel de mer	Impuretés dérivées de gaz	Total des impuretés
D 55	1,53 (33%)	3,05 (67%)	4,6
D 80	1,17 (24%)	3,70 (76%)	4,9
Dôme C	2,16 (28%)	5,51 (72%)	7,7
Pôle Sud	1,65 (19%)	6,94 (81%)	8,6
Moyenne	(26 ± 6 %)	(74 ± 26 %)	-

Tableau 50: Contribution des impuretés issues du sel de mer et de la conversion gaz-particules pour la neige de différents sites de l'Antarctique de l'Est.

5.2. ACIDITE DE LA NEIGE

5.2.1. Variations géographiques

L'acidité de la neige antarctique est essentiellement due à la présence des acides minéraux HNO_3 , H_2SO_4 et parfois HCl (voir chapitre 3). La teneur en protons observée sur l'axe semble augmenter lentement depuis la côte vers l'intérieur du continent ($1,21 \pm 0,49 \mu\text{Eq.l}^{-1}$ entre 0 et 200 km de la côte, $1,75 \pm 0,59 \mu\text{Eq.l}^{-1}$ entre 200 et 400 km, voir figure 51). Cette observation se trouve confirmée en analysant les résultats présentés dans le tableau 49 qui font apparaître une acidité plus forte dans les sites du haut du plateau antarctique ($3,0 \mu\text{Eq.l}^{-1}$) qu'en Terre Adélie ($1,7 \mu\text{Eq.l}^{-1}$).

Cette augmentation des teneurs en proton de la neige des régions les plus centrales de l'Antarctique est le résultat de plusieurs phénomènes. Tout d'abord nous avons montré que la neige des régions centrales pouvait occasionnellement contenir des quantités significatives d'acide chlorhydrique, cet acide étant semble-t-il libéré suite à une altération de l'aérosol marin au cours de son transport au-dessus du continent antarctique (voir paragraphe 2). D'autre part, à l'exception de Dôme C et de Vostok, la neige des régions centrales contient également plus d'acide nitrique que la neige des régions côtières. Nous avons avancé l'hypothèse d'un transport longue distance de l'acide nitrique formé près des cellules orageuses mais l'origine de cet acide reste encore une question ouverte (paragraphe 4). Les teneurs en acide sulfurique de la neige augmentent également un peu pour les sites les plus continentaux mais nous avons montré au paragraphe 3 que cela était lié au mode de dépôt et non à une augmentation de l'intensité de la source ou du transport. L'acide sulfurique, en dehors des périodes d'activité volcanique, semble dériver de l'activité biogénique à la surface des océans.

5.2.2. Variations temporelles

Sur les figures 82 (D 55 et D 80) et 83 (Dôme C et Pôle Sud), nous avons reporté les variations du proton ainsi que ces trois composantes (HNO_3 , H_2SO_4 et HCl) pour la période 1959-1969.

Pour ce faire, nous avons tracé sur chaque diagramme un profil lissé (sur trois points) des trois quantités suivantes :

$$\begin{aligned}
 & \bullet \left[\text{Cl}^-_{\text{ex}} \right] = \left[\text{Cl}^- \right] - 1,166 \left[\text{Na}^+ \right] \quad \text{soit } \underline{\text{HCl}} \\
 & \bullet \left[\text{Cl}^-_{\text{ex}} \right] + \left[\text{NO}_3^- \right] \quad \text{soit } \underline{\text{HCl} + \text{HNO}_3} \\
 & \bullet \left[\text{Cl}^-_{\text{ex}} \right] + \left[\text{NO}_3^- \right] + \left[\text{SO}_4^{--\star}_{\text{ex}} \right] = \left[\text{Cl}^- \right] - 1,166 \left[\text{Na}^+ \right] + \left[\text{NO}_3^- \right] + \left[\text{SO}_4^{--} \right] - 0,121 \left[\text{Na}^+ \right] \\
 & \quad \text{soit } \underline{\text{HCl} + \text{HNO}_3} + \underline{\text{H}_2\text{SO}_4}
 \end{aligned}$$

La troisième courbe qui représente la somme des trois acides HCl , HNO_3 et H_2SO_4 coïncide très bien, aux erreurs expérimentales près, avec les valeurs expérimentales de l'acidité. Dans le cas particulier de D 55, n'ayant pas pu déterminer correctement les valeurs expérimentales de la teneur en proton (voir paragraphe 4.1., Chapitre 3), nous présentons uniquement la courbe de reconstitution (figure 82).

Au Pôle Sud (figure 83), la teneur en proton de la neige présente des variations saisonnières avec maximum en été, le rapport été-hiver étant de 1,3 (figure 45). Les variations saisonnières obtenues dans la neige de ce site sont le résultat d'une augmentation simultanée des teneurs en H_2SO_4 , HNO_3 et HCl durant la période estivale.

Ces variations saisonnières étant mises à part, l'activité volcanique influence fortement la teneur en proton de la neige par suite de l'augmentation de la teneur en acide sulfurique. Sur les figures 82 et 83 nous pouvons observer l'importance de la perturbation en proton de la neige ayant suivi l'éruption du Mont Agung. Notons que la perturbation qui en résulte semble beaucoup plus marquée dans les couches de neige des régions centrales (Dôme C et Pôle Sud, figure 83) que dans les régions plus côtières (D 55 et D 80, figure 82). Ceci est une conséquence du dépôt sec d'acide sulfurique qui représente environ 75% des retombées au Dôme C et 50% au Pôle Sud (voir paragraphe 3.2.4.1.). Les accidents volcaniques représentent cependant la principale cause des variations à cours terme de la teneur en proton de la neige.

D'autres causes telles que la modulation par l'activité solaire, les tests nucléaires et l'évènement Tunguska n'ont pas entraîné de modifications de la teneur en acide nitrique et par conséquent en proton dans la neige.

5.3. NEUTRALISATION DE L'ACIDITE

A l'échelle globale l'acidité atmosphérique peut être neutralisée, soit par des particules de carbonates (calcium et magnésium) parfois présentes dans l'aérosol d'origine terrigène, soit par l'ammoniac émis essentiellement depuis la surface des continents.

Dans la neige déposée en Antarctique durant la période actuelle, nous avons montré que le calcium et le magnésium proviennent pour l'essentiel du sel de mer, la contribution terrigène restant négligeable (voir paragraphe 5.1.).

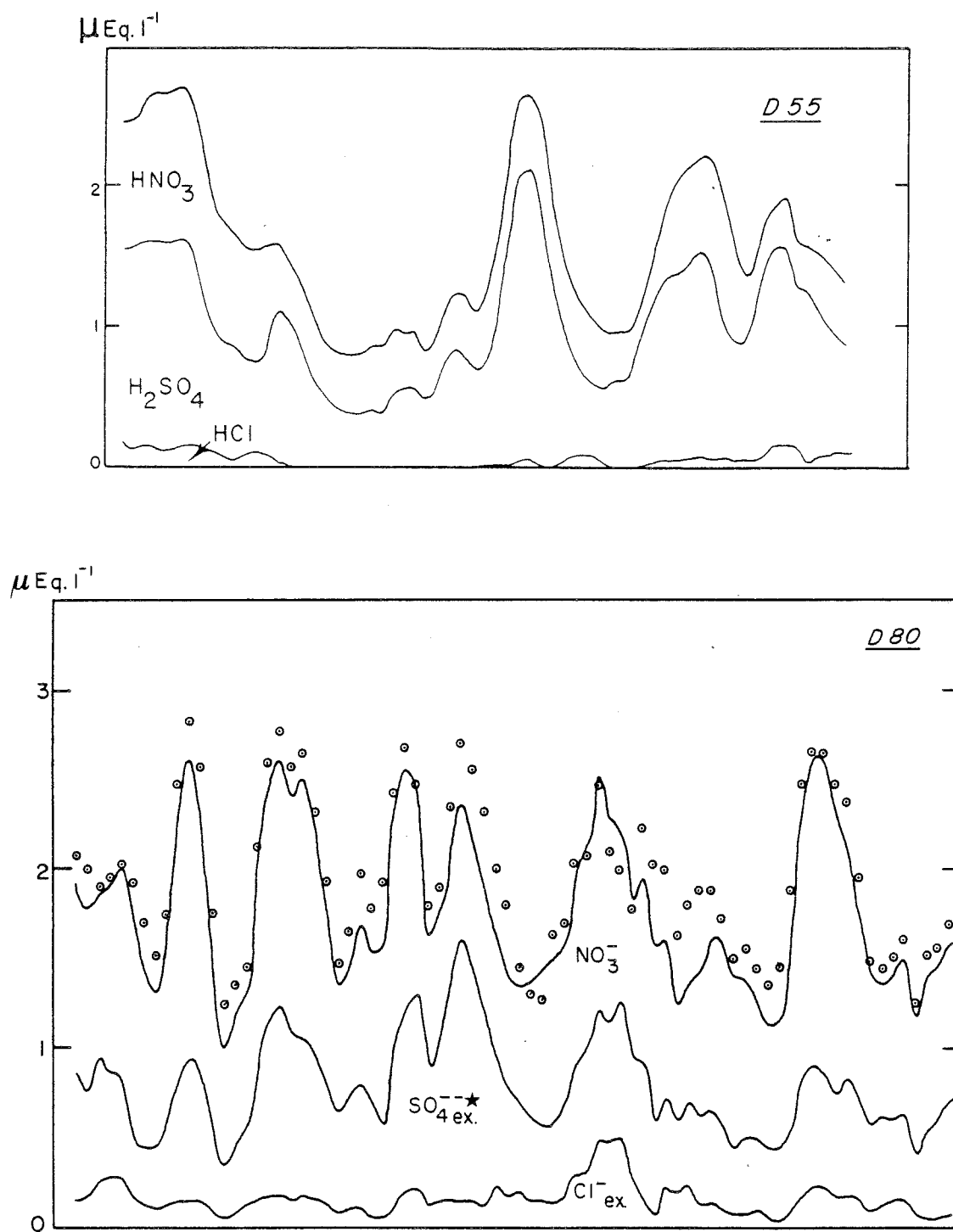


Figure 82 : Reconstitution de l'acidité à D 55 et D 80 sur la période 1959-1969, les acidités expérimentales sont notées ⊙

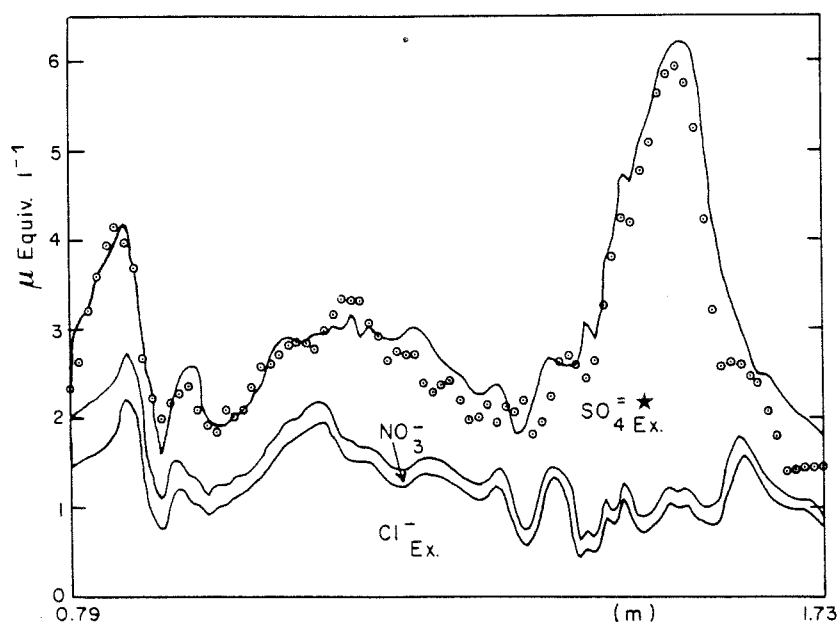
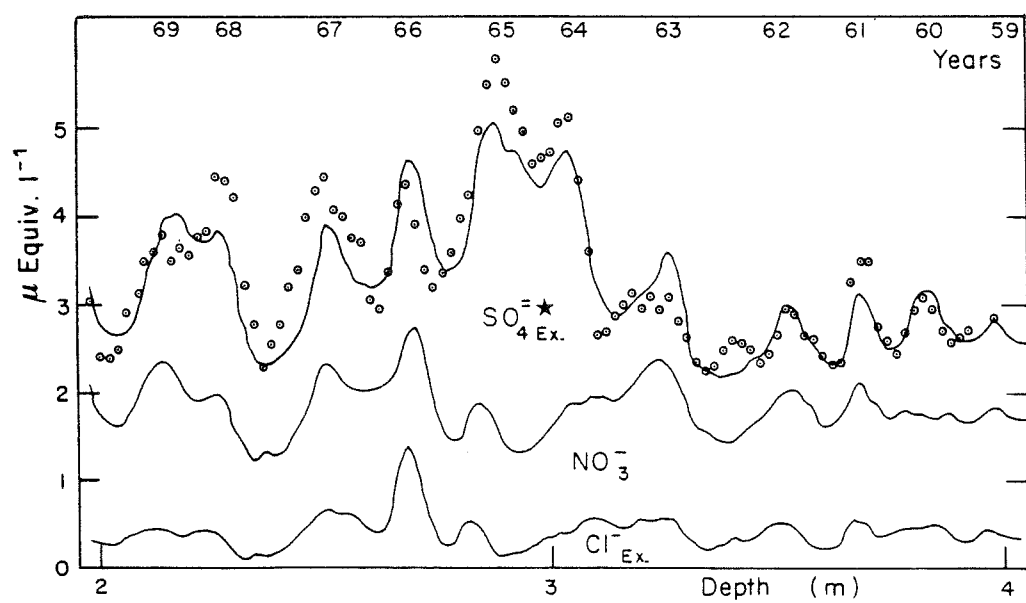


Figure 83 : Reconstitution de l'acidité au Pôle Sud et au Dôme C (période 1959-1969).

L'ensemble des échantillons de neige et de glace couvrant la période récente présente de faibles teneurs en NH_4^+ (0 à 5 ng.g^{-1} , soit 0 à 0,3 $\mu\text{Eq.l}^{-1}$). Ces faibles valeurs suggèrent un très faible taux de neutralisation de l'acidité atmosphérique de "bruit de fond" par l'ammoniac.

Les sources potentielles d'ammoniac sont essentiellement localisées sur les continents (décomposition de la matière organique, source anthropogénique). Par suite d'une reprise importante par les précipitations dans les basses couches de l'atmosphère, l'ammoniac dont le temps de résidence est estimé à 1 à 5 jours a donc peu de chance d'être transporté jusqu'en Antarctique. Notons que nos résultats sont en désaccord total avec une étude récente (Gras 1983) portant sur l'aérosol antarctique qui suggère une neutralisation quasi totale de l'acide sulfurique par l'ammoniac.

Au vu des difficultés de mesure de l'ammonium (voir paragraphe 4.2, chapitre 1) il semble très possible que ces auteurs aient eu des problèmes de contamination. Nos résultats montrent donc que dans les conditions actuelles de la circulation atmosphérique l'acidité de l'aérosol atmosphérique antarctique est peu neutralisée.

C H A P I T R E V

PALEO-ENVIRONNEMENT DES 30 000 DERNIERES ANNEES

1 - INTRODUCTION

L'étude des archives atmosphériques conservées au sein des calottes polaires est un outil très précieux pour essayer de comprendre les grands événements du passé ayant eu un impact sur l'environnement global. Il est remarquable de constater qu'une carotte de glace conserve en mémoire à la fois un indicateur climatique (^{18}O ou D), la composition de gaz traces atmosphériques (en particulier le CO_2) et différents autres paramètres liés à la chimie de l'aérosol soluble ou insoluble.

Les résultats présentés dans le chapitre précédent avaient trait à la précipitation actuelle. Nous avons en quelque sorte étalonné les méthodes glaciochimiques sur les années les plus récentes. Cela étant fait, nous pouvons maintenant passer à des périodes de temps beaucoup plus lointaines, en particulier étudier quel a pu être l'impact d'une glaciation sur la chimie atmosphérique.

Au moment où nous avons débuté ce travail, trois forages qui intègrent la fin de la dernière glaciation (15 000 B.P.) et la période holocène (0 à 11 000 B.P.) avaient été réalisés à Byrd (2150 m : période 0 - 70 000 B.P. environ), Vostok (950 m : 0 - 56 000 B.P.) et Dôme C (905 m : période 0 - 30 000 B.P.). Sur le forage de Byrd, une première étude avait mis en évidence une augmentation d'un facteur 1,7 à 2,5 des teneurs en Na^+ , K^+ , Mg^{++} et Ca^{++} entre la période holocène et la dernière glaciation (Ragone et Finelli 1972). Ces auteurs avaient alors proposé le volcanisme local comme source probable de ces impuretés. En 1977, Cragin et al. ont étendu l'étude de cette carotte aux éléments (Al, Si) et SO_4^{--} . Ils ont obtenu une augmentation d'un facteur 1,4 à 3,1 pour Na^+ , K^+ , Ca^{++} et Mg^{++} ; 7 environ pour Al, Si et 1,5 pour le sulfate. Cragin et al. 1977 interprètent ces résultats en termes d'augmentation des retombées de poussières d'origine terrigène durant la dernière période glaciaire, le volcanisme ne semblant par ailleurs pas responsable de l'augmentation des teneurs en sulfate.

Au Dôme C, Petit et al. 1981 ont montré que les impuretés d'origine marine (Na et Cl) augmentaient d'un facteur 5, les poussières d'origine terrigène (microparticules et Aluminium) d'un facteur 20 à la fin de la dernière glaciation. A partir de ces résultats, ces auteurs proposaient une plus forte circulation atmosphérique méridienne, associée à des conditions météorologiques plus arides sur les continents, durant la période froide.

Toutes ces études faisaient donc apparaître une augmentation des impuretés d'origine marine et terrigène durant la dernière glaciation, les facteurs d'augmentation étant sensiblement plus élevés au Dôme C qu'à Byrd. Cependant, très peu de ces données concernaient les impuretés provenant de la conversion gaz-particule (NO_3^- , SO_4^{--} , H^+ , NH_4^+ , ...).

Notre but était tout d'abord d'étudier la totalité de la partie soluble des impuretés et ce, en plusieurs sites, afin d'avoir une vue générale à l'échelle de l'Antarctique. L'étude réalisée sur la carotte de Vostok (De Angelis et al. 1984) a donné une balance ionique déséquilibrée pour les échantillons datant de la dernière glaciation (voir paragraphe 5.1., chapitre 3), ce qui n'a pas permis d'interpréter correctement tous les résultats. En particulier, les variations des teneurs en NO_3^- , SO_4^{--} , H^+ et NH_4^+ (liées à l'aérosol secondaire) au cours du dernier grand changement climatique (11 000 à 15 000 B.P.) n'ont pas pu être discutées.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord l'étude du forage du Dôme C pour lequel nos investigations ont été les plus poussées et où nous avons pu pour la première fois établir le bilan ionique de la glace de la dernière glaciation. Nous effectuerons ensuite une comparaison des résultats obtenus en des sites très différents géographiquement tels que Dôme C et Vostok en Antarctique de l'Est, D 10 en Terre Adélie et Byrd en Antarctique de l'Ouest. Nous ne pourrons cependant pas traiter dans le cadre de ce travail tous les aspects du problème et nous nous limiterons à donner les grandes tendances du changement de l'environnement atmosphérique au cours de la dernière transition climatique.

2 - ETUDE DU FORAGE DU DOME C (905 m)

2.1. PRESENTATION DES RESULTATS

Cinquante deux échantillons couvrant chacun une période d'environ 5 ans et répartis le long de la carotte 905 m du Dôme C ont été étudiés. La contamination présente à l'extérieur des morceaux de glace a été éliminée par la procédure décrite au paragraphe 4.3.3. (chapitre 1). En raison des difficultés rencontrées pour réaliser le nécessaire équilibre entre les cations et les anions sur les échantillons correspondant à la dernière glaciation (voir paragraphe 5.2., Chapitre 3), des analyses supplémentaires ont été nécessaires. En particulier, outre la mesure des ions usuels (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--}) nous avons dû mesurer le calcium, le magnésium et l'aluminium. Les profils obtenus le long des 900 mètres du forage pour le sodium, le chlore, le potassium et le magnésium sont présentés sur la figure 84, l'aluminium, le calcium, l'ammonium, le proton, le nitrate et le sulfate sur la figure 85. Sur ces deux figures, nous avons reporté la teneur en $\delta^{18}\text{O}$ (‰) à partir de laquelle Lorius et al. (1979) ont défini les quatre stades climatiques suivants :

- 0 à 381 m (de glace) : la période holocène (0 - 11550 B.P.)
- 381 à 510 m (de glace) : la dernière transition climatique (10 550-15 500 B.P.)
- 510 à 687 m (de glace) : le dernier maximum glaciaire (15 500 - 23 000 B.P.)
- 687 à 870 m (de glace) : la période glaciaire (23 000 - 32 000 B.P.)

En utilisant ce même découpage, nous avons évalué sur ces quatre périodes la valeur moyenne des concentrations pour chaque élément étudié. Nous n'avons toutefois pas tenu compte du point situé à 382,6 m qui semble présenter un caractère particulier (les teneurs élevées en proton et en sulfate suggérant que cet échantillon renferme les retombées d'une importante éruption volcanique). Les moyennes ainsi obtenues (tableau 51) montrent comme cela avait déjà été mis en évidence (Petit et al. 1981), une augmentation d'un facteur 6 entre la période holocène et le dernier maximum glaciaire (D.M.G.) pour le sodium et le chlore, d'un facteur 27 pour l'aluminium.

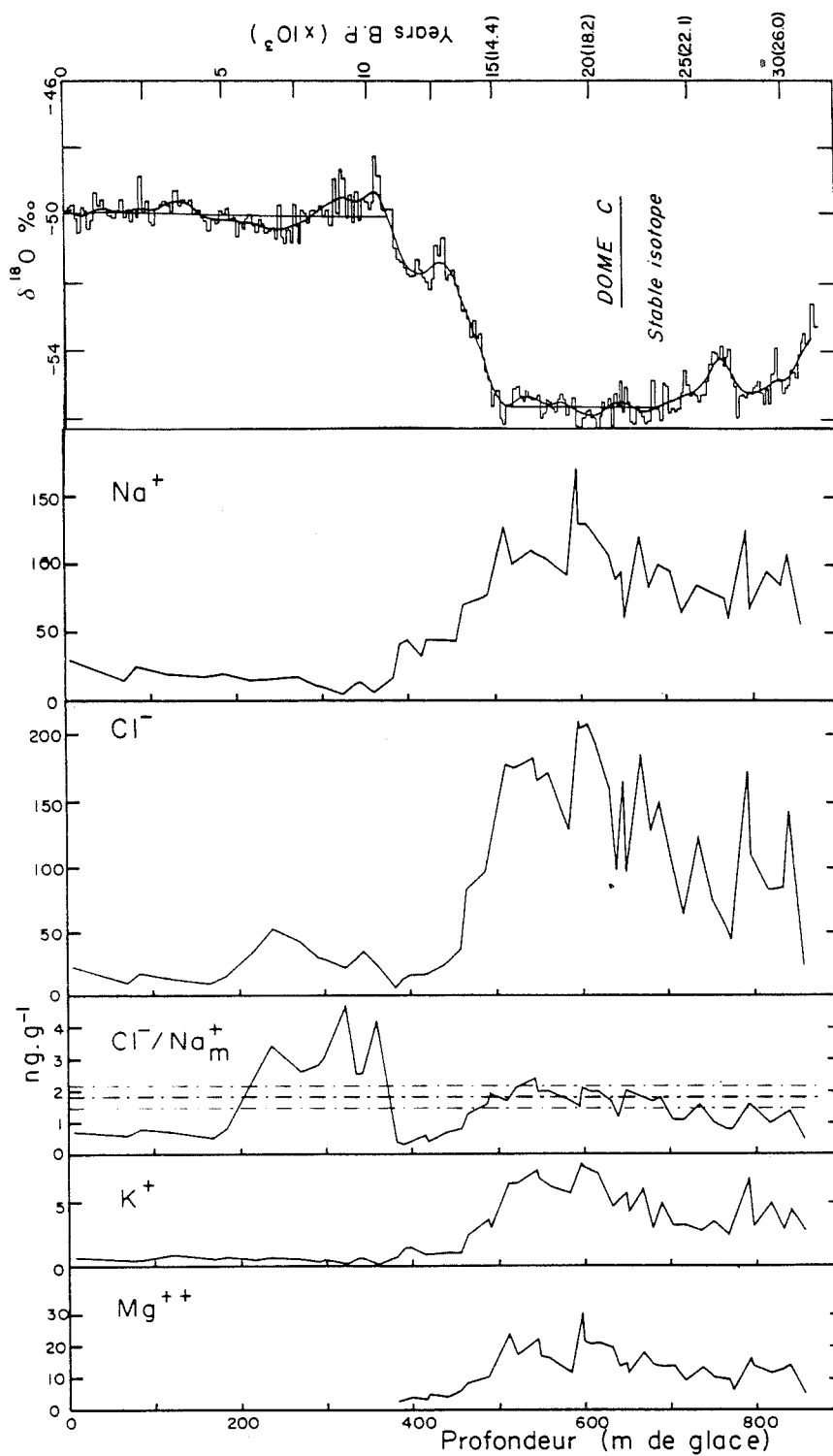


Figure 84 : Profils de Na^+ , Cl^- , Cl/Na_m , K^+ et Mg^{++} le long de la carotte de 905 m du Dôme C, le profil isotopique ($\delta^{18}\text{O}$: Lorius et al. 1979) met en évidence le dernier grand changement climatique d'il y a 11-15 000 B.P.

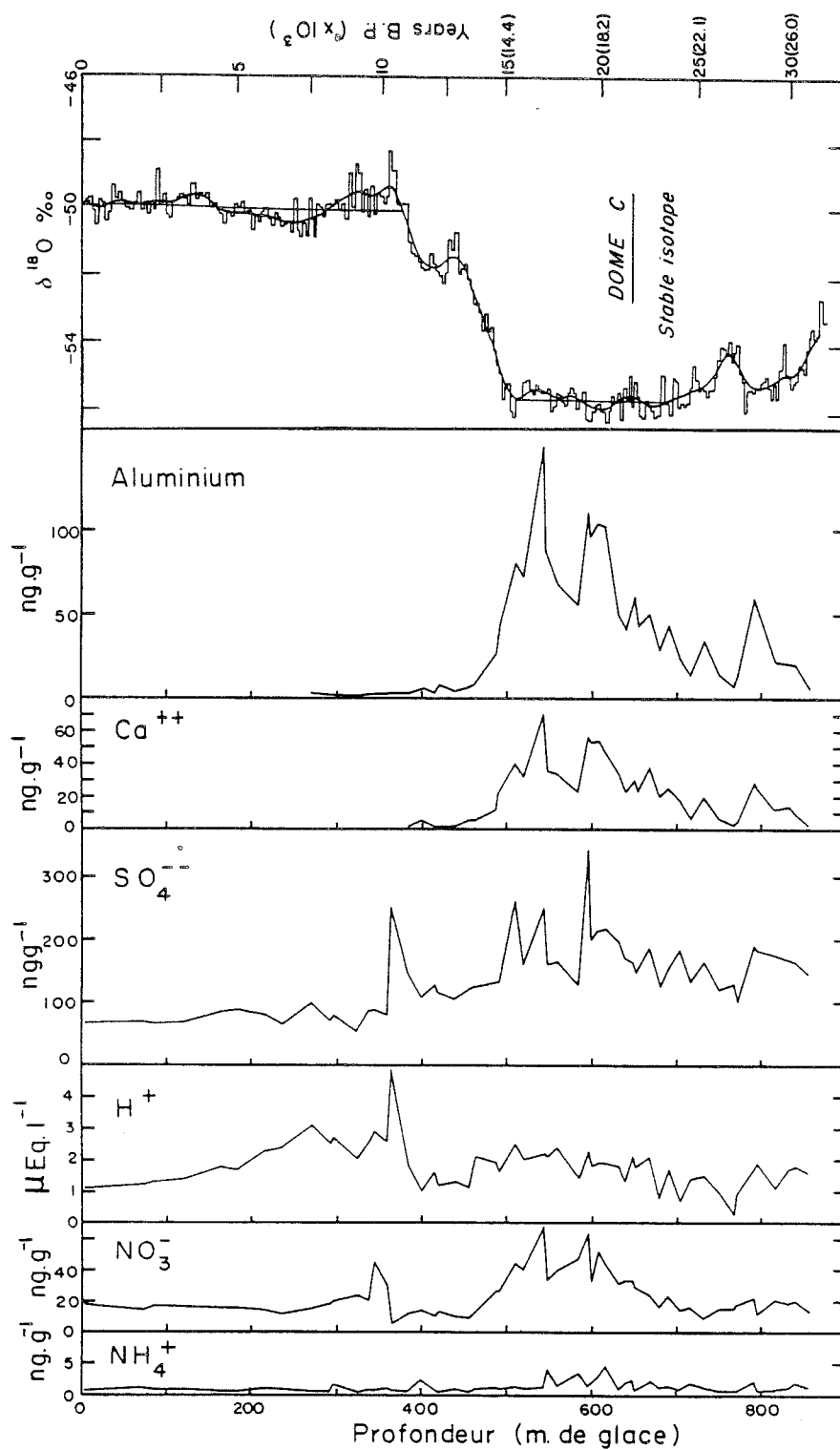


Figure 85 : Profils de Al, Ca⁺⁺, SO₄²⁻, H⁺, NO₃⁻ et NH₄⁺ le long de la carotte du Dôme C.

	Holocène (0-360m) 15 points	Transition (386-510m) 10 points	D.M.G. (520-689m) 16 points	Glaciation (705-858m) 10 points	Rapport D.M.G./ H.
Na^+ $\left\{ \begin{array}{l} \text{Na}^+_{\text{total}} \\ \text{Na}^+_{\text{m}} \\ \text{Na}^+_{\text{T}} \end{array} \right.$	0,70	2,48	4,70	3,56	6,7
	0,67	2,26	3,78	3,29	5,6
	0,03	0,22	0,92	0,27	30
Al (ng.g ⁻¹)	2,7 (1)	17,4	73,9	21,5	27
Mg^{++} $\left\{ \begin{array}{l} \text{Mg}^{++}_{\text{total}} \\ \text{Mg}^{++}_{\text{m}} \\ \text{Mg}^{++}_{\text{ex}} \end{array} \right.$	0,18	0,68	1,47	0,91	8
	0,15	0,50	0,82	0,75	5,5
	0,03	0,18	0,65	0,16	22
Ca^{++} $\left\{ \begin{array}{l} \text{Ca}^{++}_{\text{total}} \\ \text{Ca}^{++}_{\text{m}} \\ \text{Ca}^{++}_{\text{ex}} \end{array} \right.$	0,09	0,46	1,83	0,56	20
	0,06	0,09	0,17	0,14	5,6
	0,03	0,38	1,66	0,42	27
K^+	0,02	0,06	0,15	0,10	10
NH_4^+	0,04	0,06	0,12	0,07	2,7
H^+	2,1	1,6	1,9	1,2	0,9
NO_3^- $\left\{ \begin{array}{l} \text{NO}_3^- \\ \text{Acide} \\ \text{NO}_3^-_{\text{T}} \end{array} \right.$	0,31	0,29	0,63	0,26	2,0
	0,29	0,18	0,18	0,14	0,6
	0,02	0,11	0,45	0,12	22,5
Cl^- $\left\{ \begin{array}{l} \text{Total} \\ \text{Cl}^-_{\text{m}} \\ \text{acide} \end{array} \right.$	0,73	1,69	4,62	2,49	6,3
	0,51	1,67	4,24	2,49	8,3
	0,22	0,02	0,38	0	1,7
SO_4^{--} $\left\{ \begin{array}{l} \text{Total} \\ \text{SO}_4^{--}_{\text{m}} \\ \text{SO}_4^{--}_{\text{T}} \\ \text{Acide} \end{array} \right.$	1,58	2,85	3,89	3,14	2,5
	0,35	1,24	0,65	1,75	1,9
	0,09	0,45	1,78	0,45	20
	1,23	1,17	1,44	0,93	1,2
$\delta \text{Cl}/\text{Na}_{\text{m}}$	1,24	0,85	0,2	0,71	-
Σ	5,6	10,0	18,3	12,1	3,3

Tableau 51 : Evolution des différentes composantes de la partie soluble des impuretés de la neige du Dôme C (900 m). Les concentrations ioniques sont exprimées en $\mu\text{Eq.l}^{-1}$, le $\delta \text{Cl}/\text{Na}_{\text{m}}$ (voir texte) en ng.g⁻¹.

Outre ces trois éléments, nous observons un facteur d'augmentation intermédiaire entre ces deux valeurs pour Mg^{++} (8), Ca^{++} (20) et K^+ (10). Par opposition à ces derniers, des éléments tels que NO_3^- , SO_4^{--} et NH_4^+ semblent subir des augmentations beaucoup plus modestes, la teneur en H^+ quant à elle restant stable sur toute cette période de temps. La charge ionique totale (Σ) a été calculée pour chaque échantillon par :

$$\Sigma = [Na_m^+] + [Ca^{++}] + [Mg^{++}] + [NH_4^+] + [K^+] + [H^+] + [Cl^-] + [NO_3^-] + [SO_4^{--}]$$

(voir figure 28, chapitre 3).

La charge ionique totale (Σ) égale à $5,6 \mu Eq.l^{-1}$ sur la période holocène augmente durant les trois stages climatiques suivants en passant par un maximum de $18,3 \mu Eq.l^{-1}$ durant le dernier maximum glaciaire (soit une augmentation d'un facteur 3). La constitution moyenne de la partie soluble est schématisée pour les quatre étapes climatiques étudiées sur la figure 86.

2.2. IMPURETES D'ORIGINE MARINE, TERRIGENE ET ISSUES DE L'AEROSOL SECONDAIRE

L'interprétation des résultats précédents n'est pas immédiate car comme nous l'avons vu au paragraphe 5 (chapitre 3), la chimie de la glace datant de la dernière glaciation est plus complexe que celle de la chimie actuelle, du fait du plus grand nombre de composés chimiques mis en jeu. D'ailleurs, un rapide examen des facteurs d'augmentation le montre très bien : la teneur en nitrate et en sulfate augmente respectivement d'un facteur 2,0 et 2,5 tandis que l'acidité de la neige n'évolue pas (facteur 0,9) (voir tableau 51).

Rappelons ici quelques résultats obtenus au paragraphe 5, chapitre 3. Ils vont nous permettre de reconstituer l'acidité de la glace durant la dernière glaciation.

Le sodium mesuré par chromatographie ionique est la somme du sodium soluble d'origine marine (Na_m^+) et du sodium d'origine terrigène (Na_T^+) insoluble dans l'eau, mais qui se solubilise au moment de l'analyse sur les colonnes chromatographiques. La contribution du sodium terrigène a été évaluée

à partir de la mesure de la teneur en aluminium par l'équation :

$$[Na_T^+] = \frac{23600}{82300 \times 23} \cdot Al \quad (\text{voir paragraphe 5.2., Chapitre 3}).$$

La contribution du sodium marin a été calculée à partir du sodium total mesuré (Na_{total}^+) et de l'aluminium par l'équation (18) :

$$[Na_m^+] = [Na_{total}^+] - \frac{23600}{82300 \times 23} \cdot Al$$

Le calcium et le magnésium sont présents en excès par rapport au sel de mer. On peut penser que ces quantités en excès (notées Ca_{ex}^{++} et Mg_{ex}^{++} et calculées par l'équation (1), voir chapitre 3) fortement corrélées à l'aluminium sont d'origine terrigène et liées à une fraction de nitrate et de sulfate (voir paragraphe 5.4. chapitre 3).

Le nitrate est donc présent non seulement sous forme acide, mais également sous forme de sel (associé au Ca^{++} et Mg^{++} en excès). La fraction de nitrate neutre (notée NO_{3T}^-) a été estimée à partir de l'aluminium en s'appuyant sur la corrélation obtenue entre le nitrate et l'aluminium pour les échantillons de la glaciation :

$$\begin{cases} NO_3^- &= 9 + 0,4 \cdot Al \quad \text{avec } r = 0,85 \\ NO_{3T}^- &= 0,4 \cdot Al \end{cases} \quad (\text{en ng.g}^{-1}) \quad (31)$$

Le chlore présent sous forme de sel l'est parfois aussi sous forme d'acide (lorsque $Cl/Na_m > 1,8$). L'excès de chlore par rapport au sel de mer qui correspond à la forme acide (Cl_{acide}^-) s'évalue avec l'équation (1).

Le sulfate possède lui trois composantes, deux neutres (marine et terrigène) et une acide (conversion de SO_2). La composante marine du sulfate (notée SO_{4m}^{--}) s'évalue de manière différente selon que nous avons affaire ou pas à du sel de mer appauvri en chlore (et enrichi en sulfate) :

$$\text{. si } Cl/Na > 1,8 \quad [SO_4^{--}{}_m] = 0,121 [Na^+{}_m] \quad (8)$$

. si $Cl/Na < 1,8$, il faut dans ce cas tenir compte de la présence d'une fraction de sel de mer ayant perdu du chlore au profit du sulfate (voir paragraphe 4.4., chapitre 3). Nous écrivons alors l'équation 32 :

$$[SO_4^{--}{}_m] = 0,121 [Na^+{}_m] + (1,166 [Na^+{}_m] - [Cl^-]) = 1,29 [Na^+{}_m] - [Cl^-]$$

Une fraction du sulfate (notée $(SO_4^{--})_T$) arrive, tout comme une partie du nitrate $(NO_3^-)_T$, associée au calcium et magnésium en excès d'origine terrigène (voir paragraphe 5.4., chapitre 3).

Ces considérations permettent d'évaluer la contribution terrigène du sulfate par :

$$[SO_4^{--}{}_T] = [Ca^{++}{}_{ex}] + [Mg^{++}{}_{ex}] - [NO_3^-{}_T] \quad (33)$$

La composante acide du sulfate se calcule en soustrayant les fractions marine et terrigène du sulfate total mesuré.

L'analyse des différentes composantes pour chaque élément ou composés fait apparaître trois types d'impuretés solubles (voir tableau 52) :

- . les impuretés dérivées directement du sel de mer,
- . les impuretés d'origine terrigène,
- . les impuretés provenant de la conversion gaz-particules.

Sel de mer	$Na^+_m, Cl^-_m, Mg^{++}_m, Ca^{++}_m, K^+, SO_4^{--}_m$
Terrigène	$Ca^{++}_{ex}, Mg^{++}_{ex}, NO_3^-{}_T, SO_4^{--}{}_T$
Conversion de gaz	$H^+, NH_4^+, NO_3^- \text{ acide}, SO_4^{--} \text{ acide}, Cl^- \text{ acide}$

Tableau 52 : Contributions des différents ions aux trois types d'impuretés.

Le rattachement de $Cl^- \text{ acide}$ et NH_4^+ au troisième type d'impuretés est un peu arbitraire (tableau 52) mais l'acide chlorhydrique provient en fait d'un dégagement gazeux à partir du sel de mer (voir paragraphe 2, cha-

pitre 4) et l'ammonium dérive de l'ammoniac émis à partir de la surface des continents (voir plus loin, paragraphe 4). Nous les avons donc tous deux classés dans le troisième type d'impuretés en considérant leur origine gazeuse et leur fonction acide-base. Pour tous les éléments étudiés, les différentes composantes ont été calculées à l'aide des équations précédentes puis moyennées sur les quatre stades climatiques (tableau 51). L'importance relative des trois types d'impuretés (marine, terrigène et issues de la conversion gaz-particules) et leur évolution au cours du dernier grand changement climatique sont rassemblés dans le tableau 53.

	Marin (A)	Terrigène (B)	Secondaire (C)
Holocène (H.)	1,76 (30%)	0,20 (3 %)	3,88 (67%)
Transition	5,82 (58%)	1,12 (12%)	3,03 (30%)
D. M. G.	9,81 (53%)	4,54 (25%)	4,02 (22%)
Période glaciaire	8,52 (71%)	1,15 (10%)	2,34 (19%)
Rapport D.M.G./H.	5,6	22,7	1,04

Tableau 53 : Evolution de la charge en impuretés marines, terrigènes et issues de la conversion gaz-particules.

Il apparaît que les impuretés d'origine marine et terrigène augmentent respectivement d'un facteur 5,6 et 22,7 durant le dernier maximum glaciaire tandis que les impuretés du type C ne semblent pas subir de semblables modifications (voir figure 87). Durant la période holocène, nous observons, comme pour la période récente, une prédominance des impuretés issues de la conversion gaz-particules par rapport aux impuretés provenant

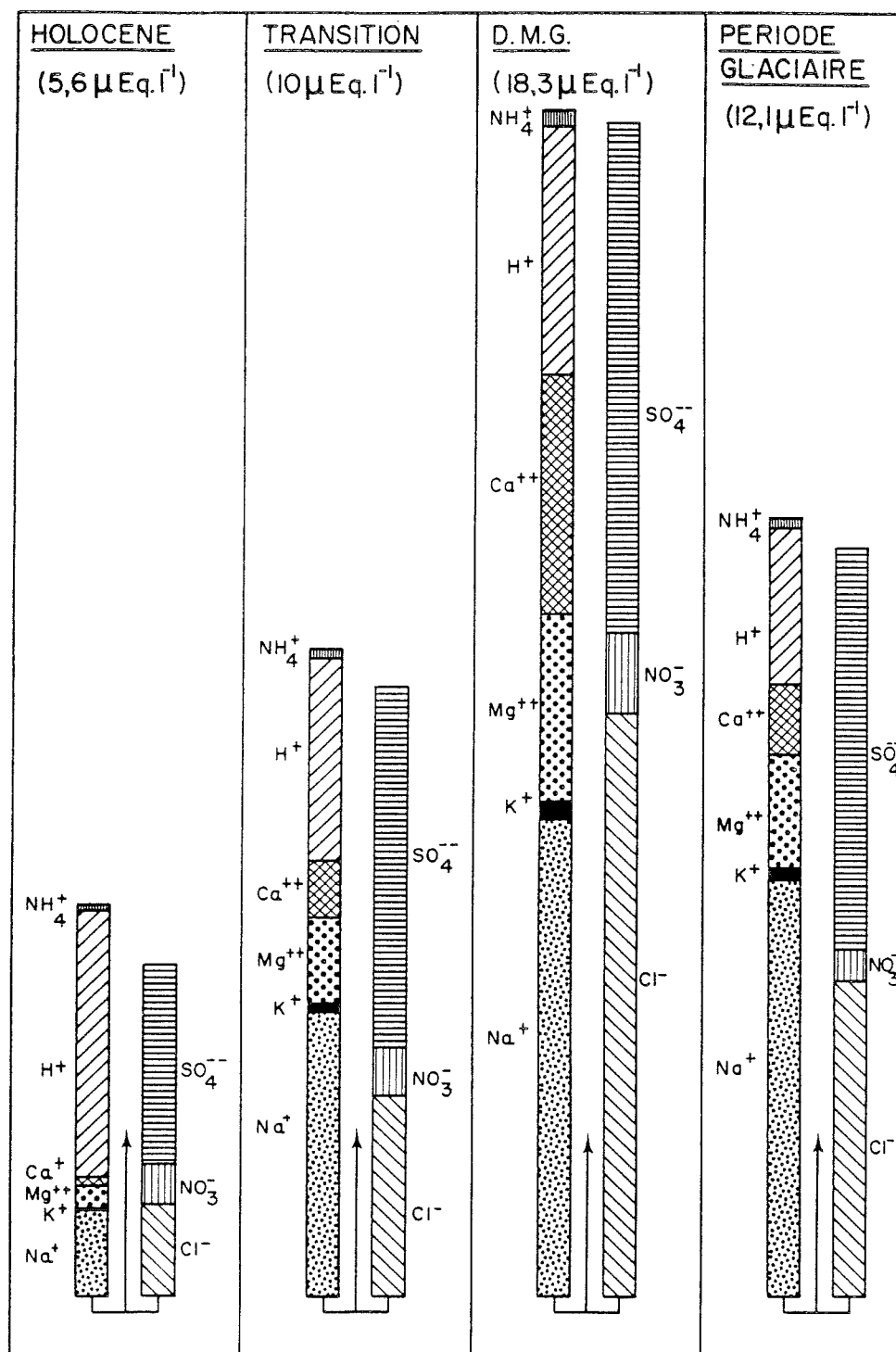


Figure 86 : Constitution moyenne de la partie soluble des impuretés pour les quatre stades climatiques (voir texte) couverts par la carotte du Dôme C.

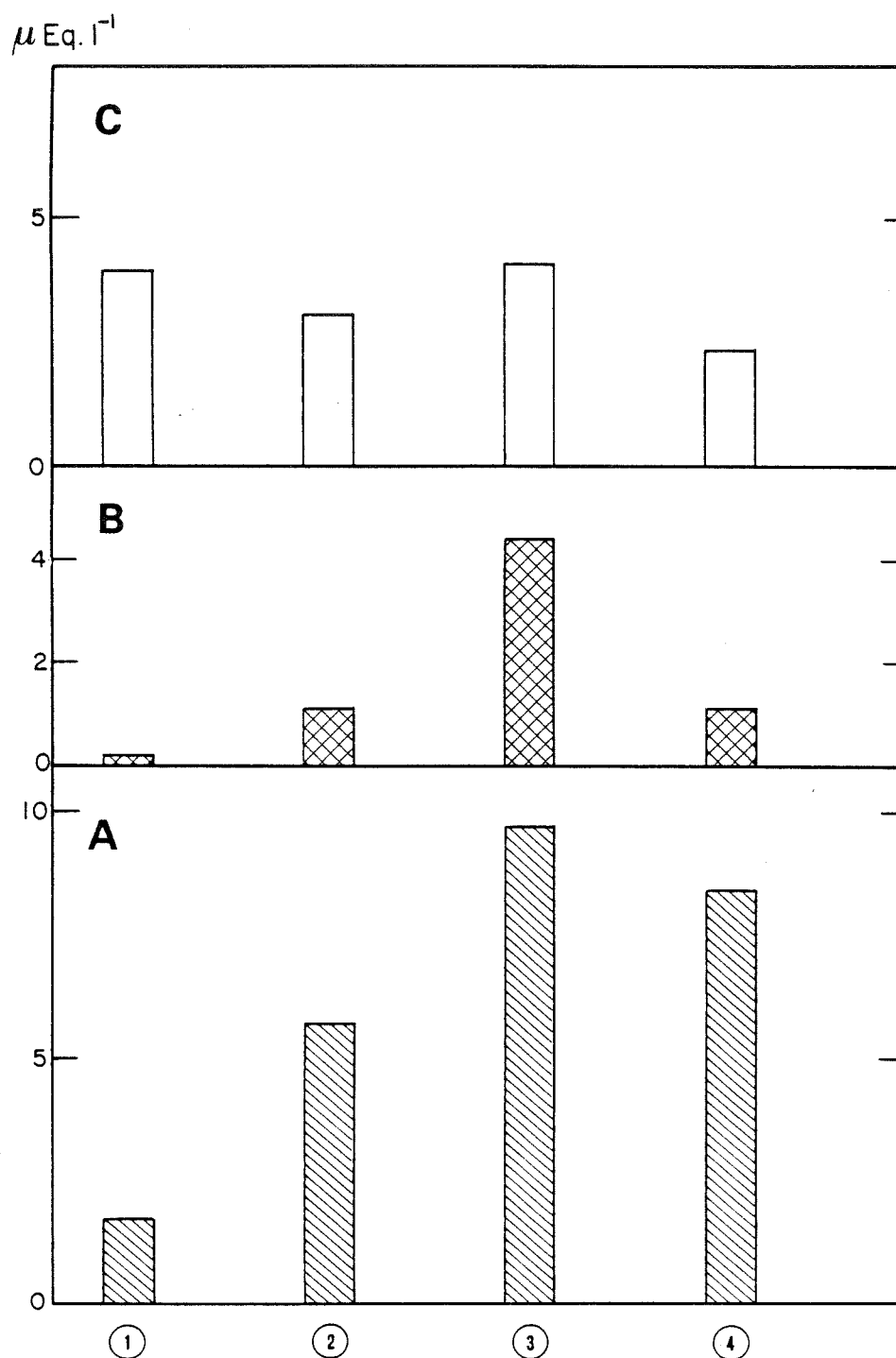


Figure 87 : Evolution de la charge en impuretés d'origine marine (A), terrigène (B) et issues de la conversion gaz-particule (C) au cours des quatre stades climatiques (1: holocène, 2: transition, 3: dernier maximum glaciaire, 4: période glaciaire).

du sel de mer, la contribution terrigène apparaissant, elle, insignifiante. Au contraire, pendant la dernière glaciation, la contribution marine représente plus de 50% du total des impuretés et la contribution terrigène apparaît être alors du même ordre de grandeur que la contribution dérivant des gaz atmosphériques.

3 - AUGMENTATION DE LA CHARGE ATMOSPHERIQUE EN AEROSOLS MARINS DURANT LA DERNIERE PERIODE FROIDE

Les teneurs en impuretés d'origine marine (sel de mer) dans la neige du Dôme C augmentent d'un facteur 5 entre la période holocène et le dernier maximum glaciaire. A Byrd, Cragin et al. 1977 observent un facteur 1,7; Ragone et Finelli 1972, un facteur 1,6. Cette différence entre le Dôme C et Byrd nous a incité, avant de tirer des conclusions à l'échelle globale, à étudier d'autres sites pour vérifier la représentativité du Dôme C d'abord par rapport au reste du haut plateau antarctique (Vostok) ensuite par rapport à l'Antarctique de l'Ouest (Byrd) et aux zones à caractère moins continental (D 10).

Les profils de sodium, de chlore ainsi que du rapport Cl/Na_m sont présentés figure 88 (Vostok), 90 (D 10) et 92 (Byrd). Le facteur d'augmentation du sodium marin entre l'holocène et le D.M.G. à Vostok est de 5, chiffre donc similaire au rapport obtenu à Dôme C. A Byrd, nous obtenons un rapport de 2,1, ce qui est légèrement plus élevé que celui avancé par les deux études antérieures (1,6 - 1,7). Cet écart est probablement dû au fait que ces auteurs n'ont pas étudié d'échantillons entre 400 et 900 mètres de profondeur. Pour notre part, nous avons eu la chance de disposer de nombreux échantillons dans cet intervalle et de parvenir malgré leur très mauvais état à les décontaminer de manière satisfaisante. Les détails expérimentaux concernant ce problème sont plus amplement développés dans l'article de J. Palais et M. Legrand 1985 (sous presse au Journal of Geophysical Research). Dans le cas de D 10, il est plus difficile d'évaluer ce facteur directement. En effet, dans les trois cas précédents, l'intervalle de profondeur correspondant au dernier maximum glaciaire était défini par examen de la courbe isotopique. Pour D 10, s'il est clair qu'entre

215 et 245 m de profondeur nous avons affaire à de la glace datant de la période glaciaire, il est impossible d'y délimiter précisément le D.M.G. A Byrd, les concentrations moyennes de sodium marin évoluent de $2,1 \mu\text{Eq.l}^{-1}$ sur le D.M.G. à $1,8 \mu\text{Eq.l}^{-1}$ sur la période glaciaire, soit un rapport de 2,1 entre l'holocène et le D.M.G.; de 1,7 entre l'holocène et la période glaciaire. A partir de la valeur moyenne de sodium prise entre 215 et 245 mètres de profondeur à D 10 ($1,35 \mu\text{Eq.l}^{-1}$), nous suggérons par analogie avec Byrd une concentration moyenne sur le D.M.G. de $1,6 \mu\text{Eq.l}^{-1}$, ce qui correspond à un facteur 3,1 entre l'holocène et le D.M.G. La comparaison des résultats obtenus sur ces quatre forages démontre une augmentation plus importante des teneurs en sodium marin pour le haut plateau de l'Antarctique de l'Est (Dôme C, Vostok) qu'en Terre Adélie (D 10) et surtout qu'en Antarctique de l'Ouest. Apparaît ici la difficulté liée au passage de la neige à l'atmosphère. Le problème est plus particulièrement crucial dans le cas de Byrd. En effet, le facteur deux obtenu entre l'holocène et le D.M.G. peut être interprété comme étant le reflet d'une augmentation de la teneur en aérosols marins de l'atmosphère, mais peut aussi être le résultat d'une forte diminution du taux d'accumulation durant le dernier maximum glaciaire. Afin d'essayer de répondre à ces questions, nous avons étudié le flux de retombées moyen de sodium marin pour chaque site. La première difficulté rencontrée concerne le taux d'accumulation annuel dont on connaît encore mal les variations dans le passé. Pour effectuer le calcul du flux de retombées durant le D.M.G., nous avons utilisé la valeur d'accumulation proposée soit à partir de modèles d'écoulement de la calotte polaire (Shumski et al. 1980 pour Vostok, Whillans, 1981 pour Byrd), soit par comparaison de certains accidents isotopiques caractéristiques obtenus dans la glace et dans les carottes marines (Lorius et al. 1979 pour le Dôme C). Pour le Dôme C nous avons également considéré la valeur proposée par Raisbeck et al. 1981, établie à partir des variations de la teneur en Beryllium de la glace.

Dans le tableau 54, nous avons, à partir des taux d'accumulation proposés, évalué les flux de retombées moyens pendant le dernier maximum glaciaire. A Byrd, bien que le taux d'accumulation soit plus faible durant le D.M.G. ($a = 9 \text{ g H}_2\text{O/an}$) que durant l'holocène ($a = 13 \text{ g H}_2\text{O/an}$), le flux de retombées moyen passe de $3,2 \text{ kg/km}^2/\text{an}$ pendant l'holocène à $4,6 \text{ kg/km}^2/\text{an}$ durant le D.M.G. Nous pouvons d'ores et déjà affirmer que même à Byrd l'augmentation des concentrations de la neige entre les deux périodes climatiques est le résultat d'un changement dans les concentrations atmosphériques. Au Dôme C, l'étude de la période 1959-1969 avait permis d'établir la relation

Sites et périodes considérés		Concentration moyenne de Na^+_m (en $\mu\text{Eq.l}^{-1}$)	Accumulation (g/ $\text{H}_2\text{O}/\text{an}$)	Φ ($\text{kg}/\text{km}^2/\text{an}$)	Cl/Na_m	$\delta\text{Cl}/\text{Na}_m$
DOME C	Holocène (0-360 m)	0,67	3,4	0,50	$2,1 \pm 1,4$	1,24
	Dernier Maximum Glaciaire (520-689 m)	3,78	2,6 (Lorius et al.1979) 1,7 (Raisbeck et al.1981)	2,26 1,50	$1,9 \pm 0,3$	0,2
VOSTOK	Holocène (0-250 m)	1,04	2,2 (Barkov et al.1977)	0,53	$0,7 \pm 0,3$	$1,1 \pm 0,3$
	Dernier Maximum Glaciaire (360-550 m)	5,24	1,1 (Shumski et al.1980)	1,33	$1,5 \pm 0,1$	$0,3 \pm 0,1$
B Y R D	Holocène (0-1050 m)	1,07	13 (Raynaud et Whillans 1982)	3,2	$1,8 \pm 0,4$	$0,3 \pm 0,3$
	Dernier Maximum Glaciaire (1350-1700)	2,24	9 (Whillans, 1981)	4,6	$1,9 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,1$
D 10	Holocène 197-208 m)	0,52	20-30 ?	2,2 - 3,3	$1,5 \pm 0,2$	$0,3 \pm 0,2$
	Dernier Maximum Glaciaire ?	1,62*	?	?	$2,1 \pm 0,2$	$0,3 \pm 0,2$

Tableau 54 : Variations de la concentration et du flux de retombées moyen de sodium marin, du rapport Cl/Na_m et de son écart à la valeur de l'eau de mer ($\delta\text{Cl}/\text{Na}_m$) au cours du dernier changement climatique pour Dôme C, Vostok, Byrd et D10.

* voir texte pour l'intervalle de profondeur choisi.

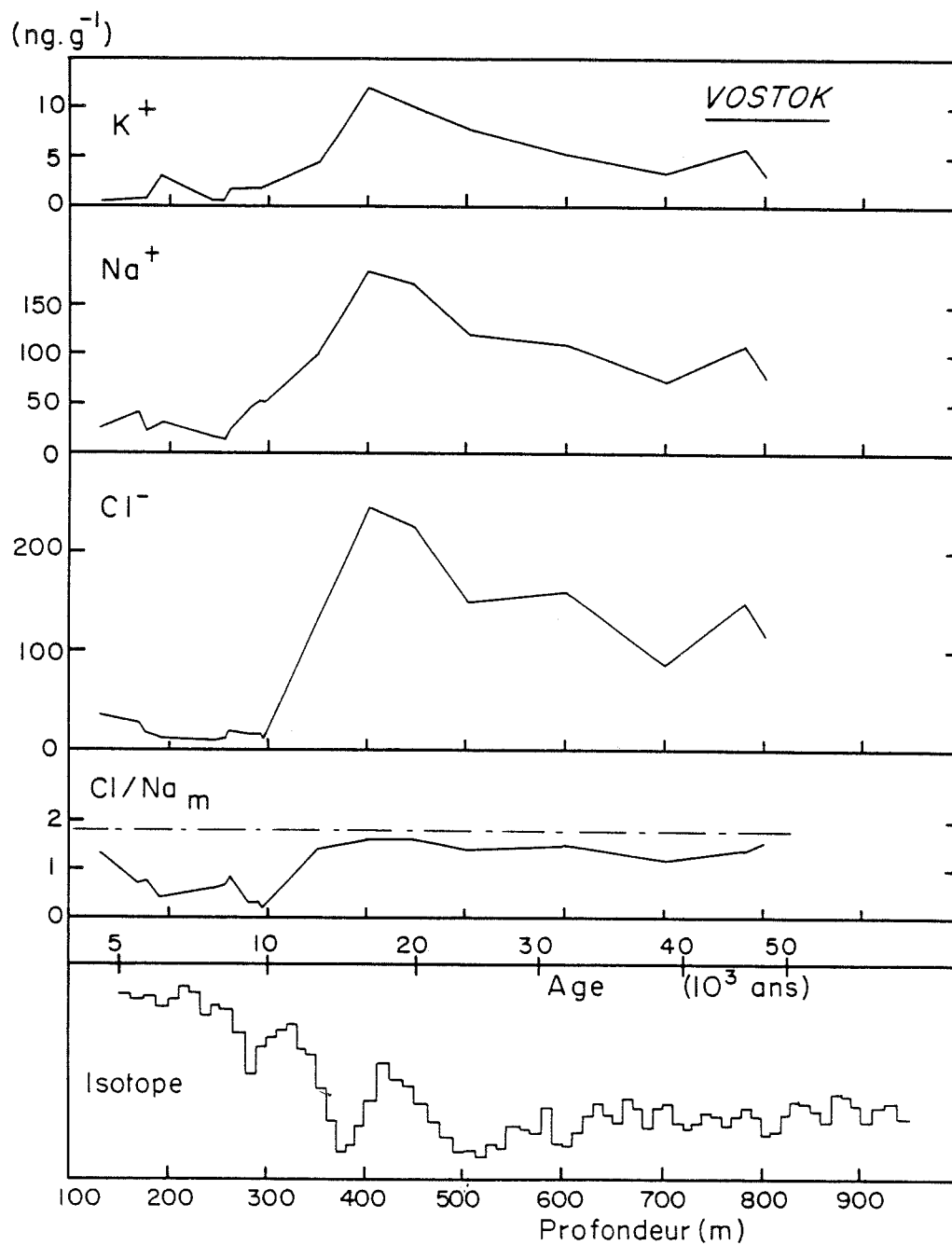


Figure 88 : Profils de K^+ , Na^+ , Cl^- et Cl/Na_m le long de la carotte 950 m de Vostok, le profil isotopique (Gordienko et al.1982) met en évidence le changement climatique survenu il y a 10-15 000 ans.

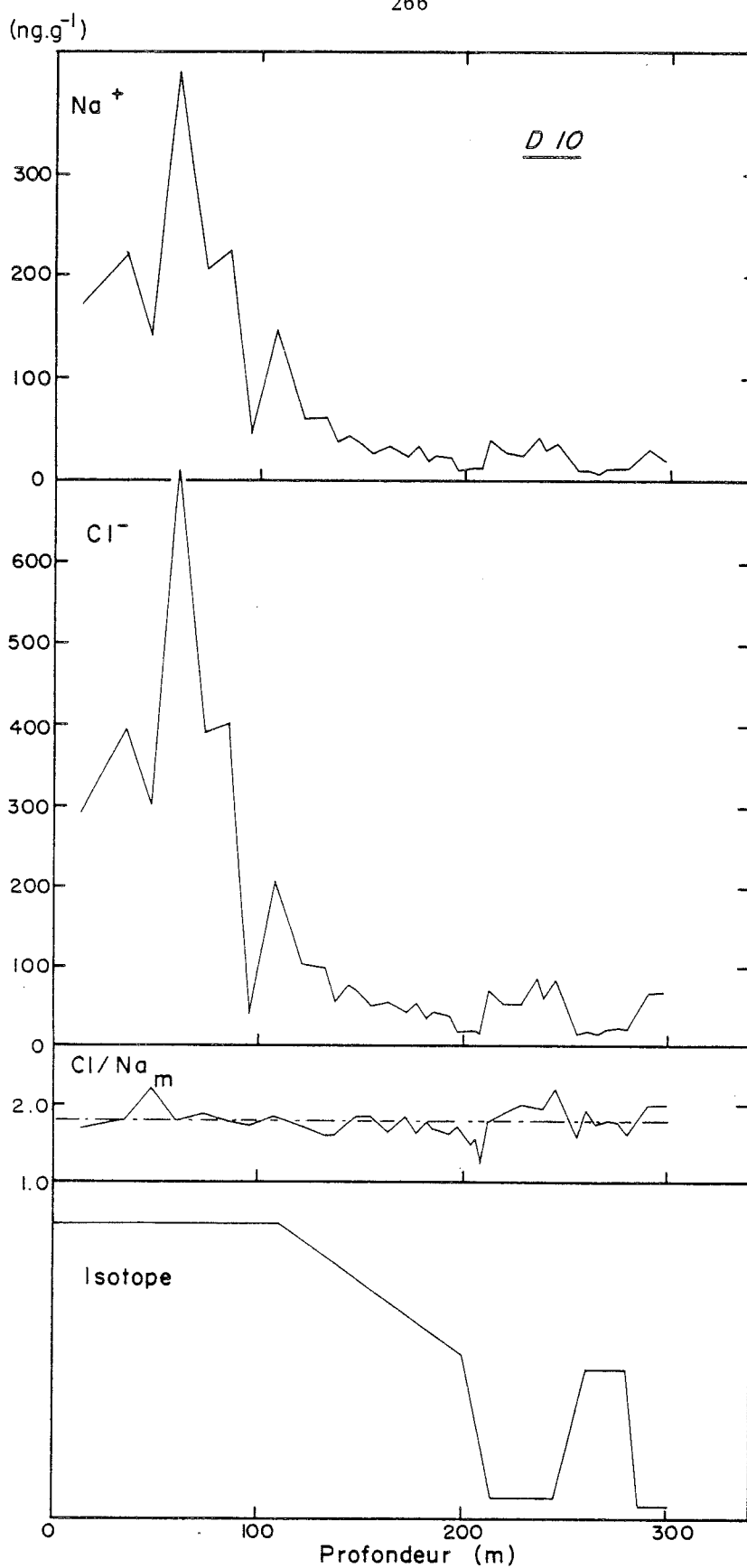


Figure 90 : Profils de Na^+ , Cl^- et Cl/Na_m le long des 300 m du forage D10. La courbe isotopique indique le grand changement climatique (208-215 m) (Raynaud et al. 1979).

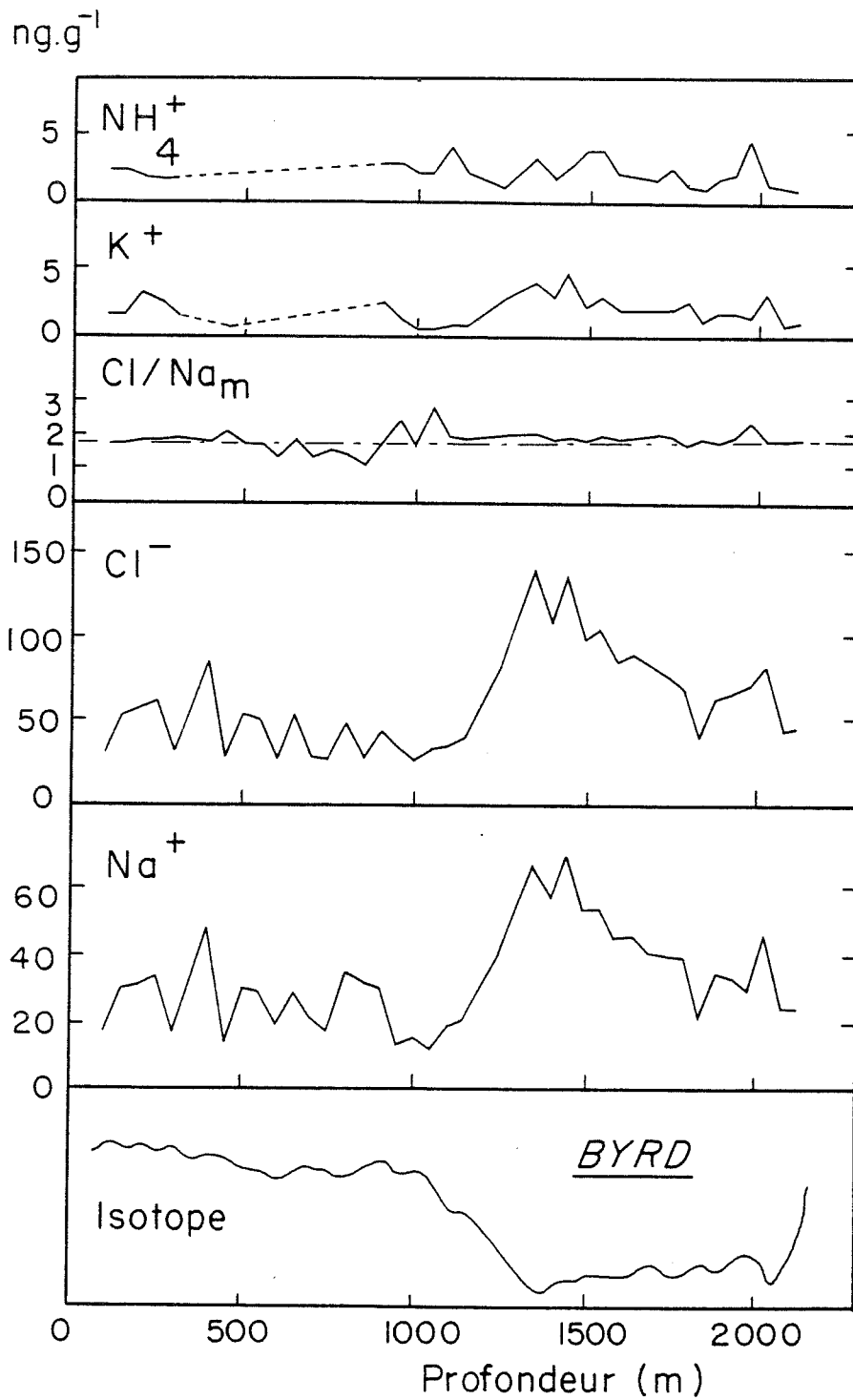


Figure 92 : Profils de NH_4^+ , K^+ , Cl/Na_m , Cl^- et Na^+ le long de la carotte de Byrd (2150 m) (Palais et Legrand, 1985).

entre le flux de retombées (Φ) et le taux d'accumulation (a) ($\Phi = 0,47 + 0,082a$)
 Au paragraphe 2.2.3., chapitre 4, nous avons pu établir que cette relation restait valable sur toute la période holocène. Si l'on ne considère qu'une variation d'accumulation entre l'holocène et le D.M.G., indépendamment de tout changement atmosphérique, le flux de retombées durant le D.M.G. aurait dû être, d'après la relation précédente, compris entre 0,60 et 0,68 kg/km²/an (à comparer au flux effectif que nous obtenons estimé entre 1,5 et 2,26 kg/km²/an).

Nous pouvons conclure à une très significative augmentation des teneurs en aérosols marins dans l'atmosphère durant le D.M.G. De plus, la figure 94 montre que contrairement à ce qui se passe durant la période holocène (figure 43, paragraphe 2.2.3., chapitre 4), les flux de retombées pendant le dernier maximum glaciaire sont assez homogènes pour l'ensemble de l'Antarctique, l'Antarctique de l'Ouest ne semblant plus se distinguer de l'Antarctique de l'Est.

Pour la période holocène, la différence entre le rapport Cl/Na obtenu dans la neige et celui de l'eau de mer (voir $\delta \text{Cl/Na}$, tableau 54) très grande dans les sites centraux comme Dôme C et Vostok (voisine de 1,0) est à l'inverse très faible (0,2 à 0,3) dans les sites comme D 10 et Byrd. Par contre, durant le D.M.G., les écarts étaient faibles tant à D10 et Byrd qu'à Dôme C et Vostok (voir figure 49, chapitre 4). Au chapitre 4, nous avons avancé l'hypothèse que ce fractionnement du sel de mer était dû à son altération en cours de transport au-dessus du continent antarctique. Les observations faites précédemment viennent appuyer l'hypothèse d'une circulation atmosphérique plus vigoureuse il y a 18 000 ans, ceci entraînant une retombée de sel de mer plus importante mais non fractionnée, même dans les régions les plus centrales de l'Antarctique.

4 - AUGMENTATION DE LA CHARGE EN POUSSIÈRES TERRIGÈNES DURANT LA DERNIÈRE PÉRIODE FROIDE

4.1. POUSSIÈRES INSOLUBLES

Les études antérieures ont montré une augmentation des teneurs en poussières terrigènes insolubles (microparticules et aluminium) de la neige entre la période chaude actuelle et la dernière période glaciaire. Pour rendre compte de cette augmentation, Petit et al. 1981, avancent l'hypothèse d'une

circulation zonale alliée à une plus grande aridité des continents entre 13 000 et 26 000 B.P. Le facteur d'augmentation des teneurs en aluminium entre ces deux périodes, voisin de 10 à Byrd et en Terre Adélie (forage de D 10), atteint 20 à 40 au Dôme C (voir tableau 55).

		DOME C	VOSTOK	BYRD	D 10
Holocène (H.)	Al (ng.g ⁻¹)	2,4 (a)	2,4 (b)	1,5 (c)	0,9 (d)
	a(g H ₂ O/an)	3,4	2,2	13	20 - 30 ?
	Φ (kg/km ² /an)	0,08	0,05	0,20	0,18-0,27
D.M.G.	Al (ng.g ⁻¹)	67 (a)	88 (b)	11,5(c)	10,1 (d)
	a (g H ₂ O/an)	1,7 - 2,6	1,1	9	10 - 15 ?
	Φ (kg/km ² /an)	1,14-1,74	0,97	1,04	1,01-1,02
Rapport concentrations D. M. G. / H.		27	37	8	11

Tableau 55 : Flux de retombées moyen d'aluminium en différents sites, sur la période glaciaire. Les concentrations utilisées proviennent de (a) ce travail, (b) De Angelis et al.1984, (c) Cragin et al.1977, (d) De Angelis et Legrand (en préparation).

Ces facteurs largement supérieurs à deux ne peuvent s'expliquer entièrement par un changement d'accumulation et suggèrent de toute façon une augmentation importante de la charge en poussières terrigènes de l'atmosphère passée. La différence apparaissant entre les différents forages étudiés demande un examen plus approfondi. En effet, cette augmentation, qui paraît plus forte dans les régions centrales, peut être la conséquence soit d'une diminution du taux d'accumulation (plus marquée dans les régions centrales durant le D.M.G.), soit d'une retombée plus importante de poussières terrigènes

dans les sites du haut plateau. Contrairement au cas du sodium, nous ne connaissons pas les variations du flux de retombées de poussières terrigènes en fonction du taux d'accumulation. Une étude antérieure portant sur l'aluminium, réalisée sur des échantillons de surface prélevés en Terre Adélie n'avait en effet pas permis de dégager une relation entre ces deux paramètres (Boutron, 1978). De même, à partir des concentrations moyennes obtenues sur les différents forages, pour la période holocène (tableau 55), le coefficient de corrélation entre le flux de retombées et le taux d'accumulation n'est pas significatif pour les quatre points considérés ($\Phi = 0,05 + 0,008 a$ avec $r = 0,89$). Les flux de retombées d'aluminium observés sur cette période de temps ne semblent d'ailleurs pas non plus mettre en évidence une retombée privilégiant les régions centrales. Il faut toutefois ici rester très prudent, car une surestimation de la teneur en aluminium à Byrd, toujours possible, (la valeur moyenne de $1,5 \text{ ng.g}^{-1}$, voir tableau 55, n'étant calculée que sur cinq points) peut avoir entraîné une forte surestimation du flux de retombées, ce qui conduirait alors à des conclusions opposées. Les flux de retombées, bien que ne variant pas linéairement avec le taux d'accumulation (a), semblent toutefois augmenter avec ce paramètre (figure 95). Ceci suggère qu'une partie de l'aluminium retombe avec la précipitation. Cette suggestion est d'ailleurs appuyée par l'observation de poussières d'origine terrigène dans les cristaux de neige en Antarctique (Kumai 1976). La figure 95 montre que le flux de retombées durant la dernière période glaciaire est au moins aussi important dans les sites centraux qu'à Byrd, alors que le taux d'accumulation y est beaucoup plus faible. Cette remarque suggère bien que durant le D.M.G. les poussières terrigènes retombaient de manière privilégiée au-dessus de 3000 mètres d'altitude. Ceci est en bon accord avec l'idée d'un "bruit de fond d'aérosol d'origine terrigène" présent dans la troposphère au-dessus de 3000 m, la poussière terrigène étant rapidement lessivée par les précipitations en-dessous de cette altitude (Delany et al. 1973). Ainsi, tant les teneurs que les flux de retombées d'aluminium, suggèrent une charge plus importante de l'atmosphère en poussières terrigènes durant la dernière glaciation. En revanche, les données disponibles ne permettent pas d'estimer de manière précise le mode de déposition de ces poussières dans la neige ni de quantifier plus précisément l'importance de la retombée en fonction de l'altitude.

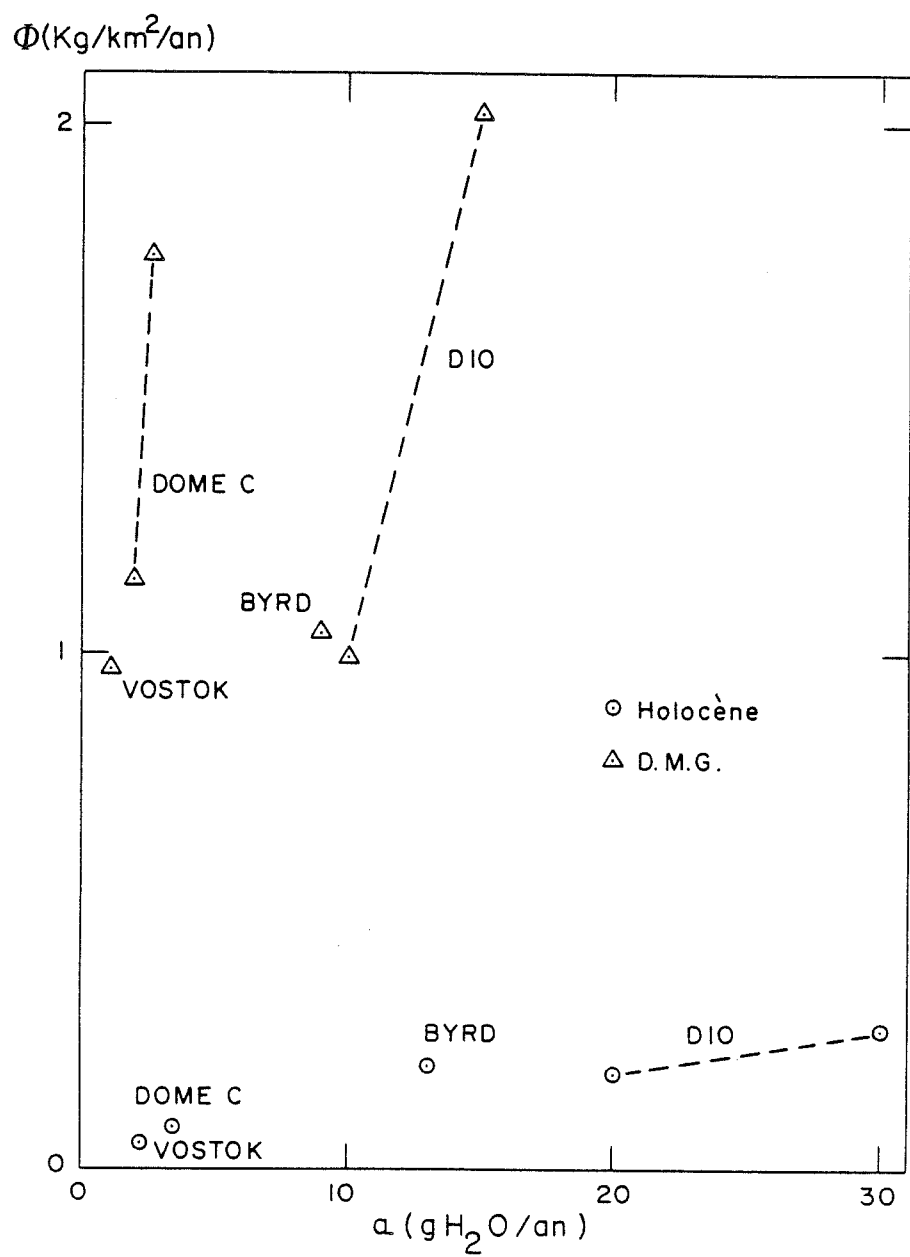


Figure 95 : Comparaison des flux de retombées d'aluminium entre la période holocène et le D.M.G.

4.2. IMPURETES SOLUBLES

La forte augmentation des poussières insolubles d'origine terrigène s'accompagne d'une augmentation simultanée de certains composés solubles. Tout d'abord, rappelons la forte corrélation obtenue au Dôme C entre les excès (par rapport à l'eau de mer) de calcium et de magnésium d'une part, et l'aluminium d'autre part ($r = 0,93$ et $r = 0,80$, voir paragraphe 5.4., chapitre 3), ces deux quantités ($\text{Ca}^{++}_{\text{ex}}$ et $\text{Mg}^{++}_{\text{ex}}$) étant associées à des nitrates et surtout à des sulfates. Par contre, l'étude du profil de Camp Century (Groënland) montre que les excès de calcium et de magnésium (respectivement de 8 et $1,6 \mu\text{Eq.l}^{-1}$: Cragin et al. 1977) durant le D.M.G., ne peuvent pas être entièrement associés en ce site à des sulfates dont la teneur n'excède pas $6 \mu\text{Eq.l}^{-1}$. Le caractère basique de cette glace (pH de l'eau de fusion égal à 8,5) ainsi que les mesures de gaz carbonique (Oeschger et al. 1982) suggèrent la présence d'une partie du calcium et du magnésium sous forme de carbonates. Ainsi, contrairement à ce que nous observons en Antarctique, les impuretés solubles d'origine terrigène retombent dans la neige déposée au Groënland durant le D.M.G. en partie sous forme de carbonates de calcium et de magnésium. Cette différence de composition entre hémisphère Nord et hémisphère Sud n'est guère étonnante car la composition minéralogique de l'aérosol émis par la surface des continents peut être très différente suivant la région considérée. Ainsi l'aérosol terrigène émis au-dessus du continent Sud Américain est beaucoup plus riche en calcite (CaCO_3) qu'en gypse (CaSO_4); à l'inverse, c'est le gypse qui est le plus fréquemment observé dans l'aérosol saharien (Prospero et al. 1981). De plus, les carbonates peuvent au cours du transport s'altérer et se transformer en sulfate et en nitrate sous l'action des composés acides atmosphériques (HNO_3 et H_2SO_4). Pour localiser plus précisément les sources d'aérosols terrigènes que l'on observe en Antarctique durant le D.M.G., il faudrait en effectuer un bilan global, car, en fait, la fraction soluble que nous avons étudiée ici ($\text{Ca}^{++}_{\text{ex}}$, $\text{Mg}^{++}_{\text{ex}}$, NO_3^- neutre, $\text{SO}_4^{--}_{\text{T}}$) ne représente qu'une faible partie ($\simeq 17\%$, par référence aux teneurs en aluminium et à la composition moyenne de la croûte de Taylor 1964) du total. Mais une telle étude de l'insoluble sortirait largement du cadre de ce travail.

Outre les ions précédents (Ca^{++} , Mg^{++} , NO_3^- et SO_4^{--}) un autre constituant de la partie soluble semble augmenter corrélativement à l'aluminium durant le D.M.G. En effet, la corrélation entre les teneurs en ammonium et en aluminium au Dôme C ($\text{NH}_4^+ = 1,0 + 0,014 \text{ Al}$, $r = 0,53$ pour 40 points) semble confirmer que la source d'ammonium est située à la surface des continents, comme nous l'avions déjà suggéré au § 5.3., chapitre 4.

Sur les autres profils (D10, Byrd et Vostok, voir figures 91, 92 et 89), les teneurs en ammonium ne semblent pas augmenter durant le D.M.G. A D10 et à Byrd, la stabilité observée des teneurs en NH_4^+ , durant le changement climatique, est logique au vu de la relation obtenue au Dôme C. L'augmentation d'une dizaine de ng.g^{-1} d'aluminium devant se traduire par une augmentation simultanée de 0,1 à 0,2 ng.g^{-1} des teneurs en ammonium, ce qui est trop faible pour être mis en évidence par nos mesures. Par ailleurs, la corrélation obtenue à Vostok ($\text{NH}_4^+ = 2,3 + 0,004 \text{ Al}$ avec $r = 0,18$ pour 17 points) n'est pas significative. Les échantillons de Vostok ont été préparés avant que ne soient réalisées les premières mesures de l'ammonium, toutes les précautions préconisées au paragraphe 4.2. (chapitre 1) n'avaient donc pas été respectées à cette époque. Nous pensons donc que la mauvaise corrélation entre l'ammonium et l'aluminium est due à une contamination résiduelle de ces échantillons par l'ammoniac.

5 - MODIFICATION DES RETOMBEES D'IMPURETES ISSUES DE LA CONVERSION GAZ-PARTICULES DURANT LA DERNIERE GLACIATION

Nous examinons maintenant dans ce paragraphe l'évolution des teneurs en impuretés dérivées de gaz atmosphériques, à savoir H^+ , NH_4^+ , NO_3^- acide, SO_4^{--} acide et Cl^- acide (voir paragraphe 2.2.), au cours du dernier grand changement climatique. Le cas de l'ammonium a été en fait traité au paragraphe précédent, car ce composé évolue de la même manière sur cette période que les impuretés d'origine terrigène. Pour les sites centraux (Dôme C et Vostok), l'acidité ne semble pas évoluer entre la période holocène et le D.M.G. (tableau 56), tandis qu'à D10 et à Byrd elle est un peu plus élevée ($\times 1,5$) durant le D.M.G.

Sites et périodes considérés		H^+ ($\mu\text{Eq.l}^{-1}$)	NO_3^- acide ($\mu\text{Eq.l}^{-1}$)	SO_4^{--} acide ($\mu\text{Eq.l}^{-1}$)
DOME C	Holocène (0-360 m)	2,1	0,29	1,23
	D.M.G. (520-689 m)	1,9	0,18	1,44
	Rapport D.M.G./ $H.$	0,9	0,6	<u>1,2</u>
BYRD	Holocène (0-1050 m)	1,33	0,61	0,58
	D.M.G. (1350-1700 m)	1,96	0,73	0,76
	Rapport D.M.G./ $H.$	1,5	1,2	<u>1,3</u>
D 10	Holocène (197-208 m)	1,56	0,62	0,58
	D.M.G. (212-245 m) ?	2,18	0,75	1,13
	Rapport D.M.G./ $H.$	1,4	1,2	<u>2,0</u>
VOSTOK	Holocène (0-250 m)	1,8	N.D.	N.D.
	D.M.G. (360-550 m)	1,9	N.D.	N.D.
	Rapport D.M.G./ $H.$	1,1	N.D.	N.D.

Tableau 56 : Comparaison des teneurs en H^+ , NO_3^- acide et SO_4^{--} acide entre l'holocène et le D.M.G. pour Dôme C, Vostok, Byrd et D 10.

Quelles composantes de l'acidité (nitrique, sulfurique ou chlorhydrique) sont à l'origine de ces variations ?

L'acidité s'écrit :

$$[H^+] = [NO_3^- \text{ acide}] + [SO_4^{--} \text{ acide}] + [Cl^- \text{ acide}]$$

$$\text{avec } [NO_3^- \text{ acide}] = [NO_3^-] - [NO_3^- T] \quad (34)$$

$$[SO_4^{--} \text{ acide}] = [SO_4^{--}] - [SO_4^{--} m] - [SO_4^{--} T] \quad (35)$$

$$[Cl^- \text{ acide}] = [Cl^-] - [Cl^- m] = [Cl^-] - 1,17 [Na^+] \quad (1)$$

Les quantités $NO_3^- T$, $SO_4^{--} T$ et $SO_4^{--} m$ ont été définies au paragraphe 2.2. Pour le site de Vostok, qui a constitué notre première étude de forages profonds, rappelons que nous n'avons pas mesuré les teneurs en calcium et en magnésium. Or la connaissance de ces deux quantités est indispensable pour évaluer le sulfate accompagnant les impuretés terrigènes ($SO_4^{--} T$) (voir paragraphe 2.2.). Une estimation de ces deux quantités est certes possible à partir des teneurs en aluminium (voir paragraphe 5.3., chapitre 3), mais nous avons pensé qu'elle n'était pas suffisamment précise pour rendre compte de variations voisines de 50%. Nous ne nous servirons donc par la suite que des résultats obtenus à D10, Byrd et Dôme C.

5.1. EVOLUTION DE LA TENEUR EN ACIDE NITRIQUE

Tandis qu'à D10 et à Byrd (figures 91 et 93) les teneurs en nitrate ne varient que faiblement entre la période holocène et le D.M.G., au Dôme C elles sont franchement plus élevées durant le D.M.G. (figure 85). Cependant, comme indiqué précédemment, cette augmentation du nitrate au Dôme C ne correspond pas en fait à de l'acide nitrique, mais à du nitrate sous forme neutre (associé au calcium et magnésium d'origine terrigène) estimé par la relation $NO_3^- T = 0,4 Al$. Si l'on applique cette dernière relation aux teneurs en aluminium voisines de 10 ng.g^{-1} observées à Byrd et D10 durant le D.M.G., nous obtenons une valeur de $NO_3^- T$ voisine seulement

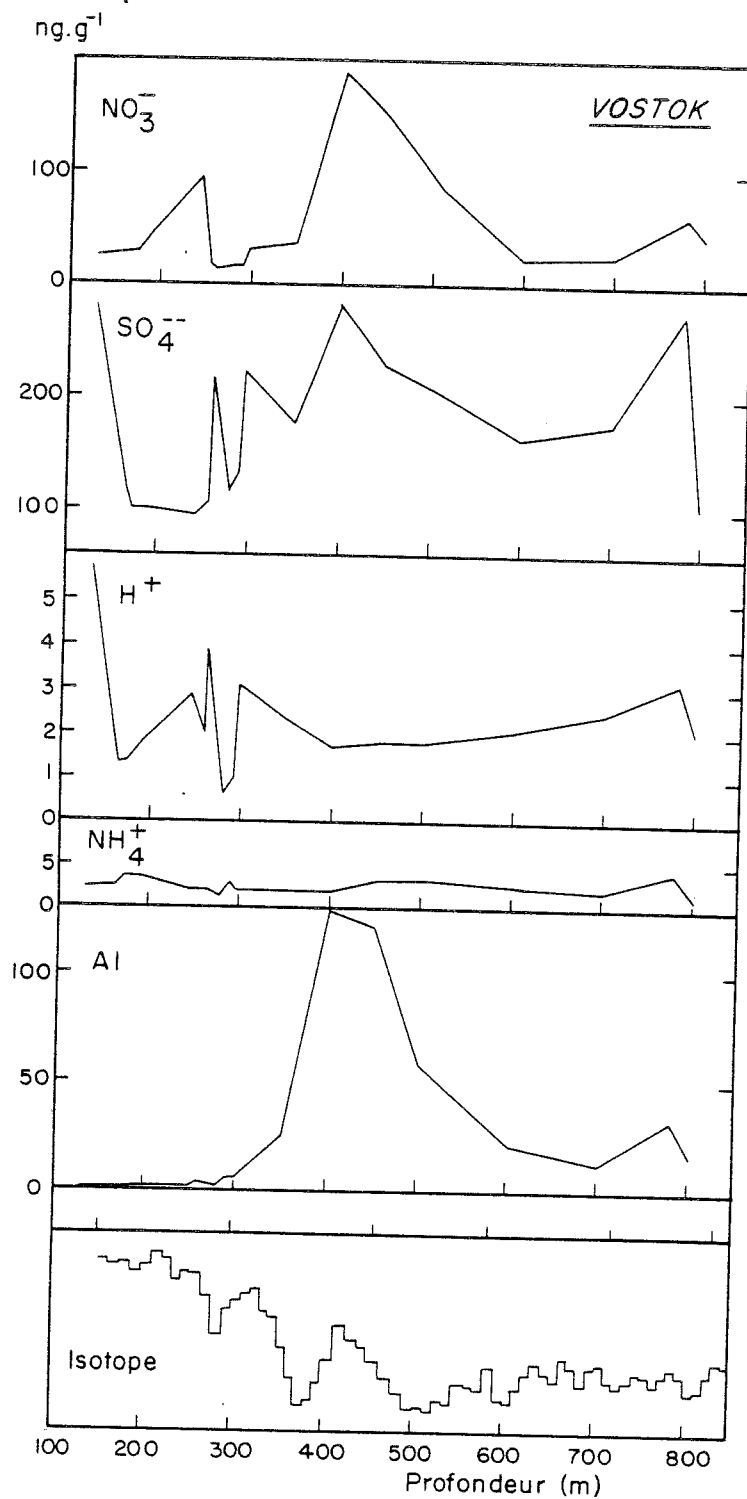


Figure 89 : Profils de NO_3^- , SO_4^{2-} , H^+ , NH_4^+ et Al le long de la carotte 950 m de Vostok.

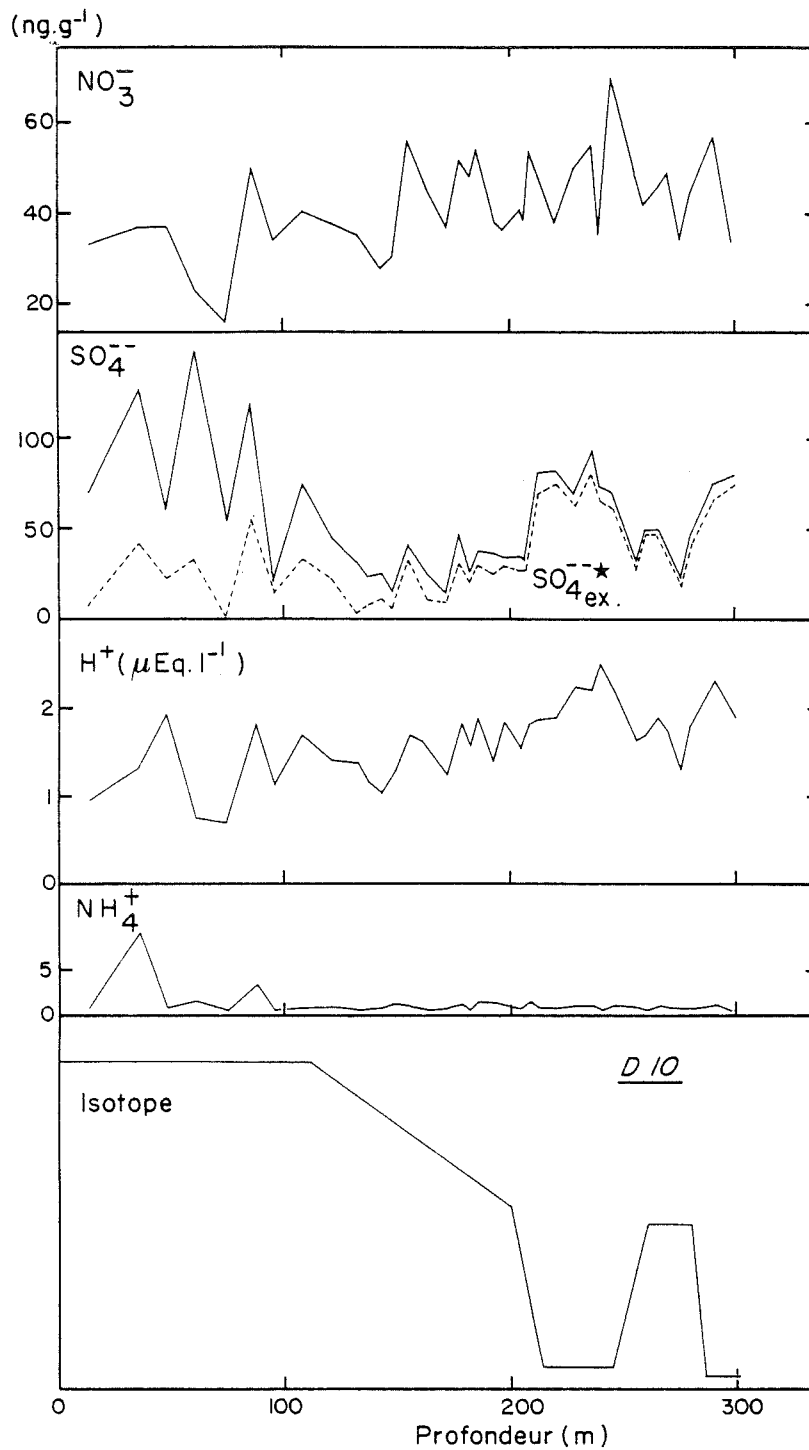


Figure 91 : Profils de NO_3^- , SO_4^{--} , H^+ et NH_4^+ le long des 300 mètres du forage D10. La courbe en pointillé représente la teneur en $\text{SO}_4^{--\star}$ (acide sulfurique).

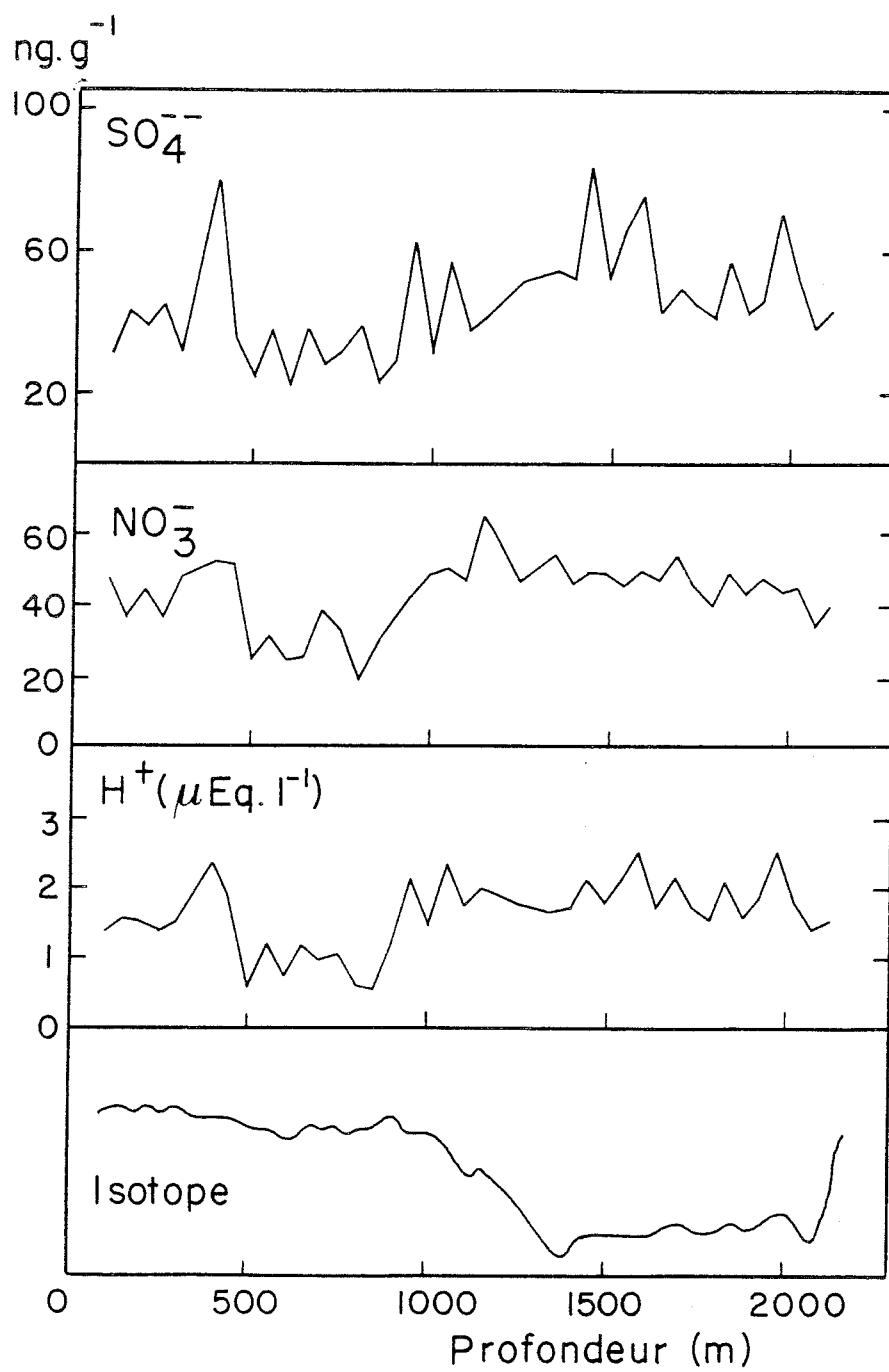


Figure 93 : Profils de SO_4^{--} , NO_3^- et H^+ le long de la carotte de Byrd (Palais et Legrand, 1985).

de 4 ng.g^{-1} , ce qui explique pourquoi la teneur en nitrate total n'évolue pas beaucoup dans ces deux sites. La teneur en HNO_3 estimée à l'aide de l'équation (34) semble légèrement plus importante à D10 et à Byrd durant le D.M.G. que durant l'holocène ($\text{D.M.G./H.} = 1,2$ voir tableau 56). Au Dôme C, en raison du mode de calcul, le facteur 0,6 que l'on obtient doit être considéré comme beaucoup moins fiable que pour les deux autres sites. En effet, la contribution terrigène, estimée sur la base de la corrélation obtenue entre nitrate et aluminium ($\text{NO}_3^- = 9 + 0,4 \text{ Al}$ au Dôme C, voir paragraphe 5.4., chapitre 3), représente au Dôme C près de 70% du nitrate total durant le D.M.G. C'est pourquoi, en ce site, une faible erreur sur la fraction terrigène (due à une mauvaise estimation de la pente de la droite des moindres carrés) entraînerait une erreur sur l'estimation de la teneur en HNO_3 beaucoup plus importante qu'à Byrd et à D10. Il apparaît donc plus raisonnable de discuter l'augmentation d'un facteur 1,2 de la teneur en HNO_3 durant le D.M.G.. Le dépôt sec semblant être un mécanisme peu important pour les retombées d'acide nitrique en Antarctique (voir paragraphe 4.6., chapitre 4), il semble légitime d'interpréter les variations observées dans la neige uniquement en terme de changement de concentrations dans l'atmosphère antarctique quelles qu'aient pu être les variations du taux d'accumulation. L'augmentation d'un facteur 1,2 des teneurs en HNO_3 de l'atmosphère antarctique il y a 18 000 ans peut s'interpréter comme une modification du transport (entraînement plus rapide vers l'Antarctique des oxydes d'azote produits par les éclairs dans la haute et moyenne troposphère, en liaison avec la plus forte circulation zonale invoquée précédemment). Mais elle peut aussi être interprétée en terme de sources (augmentation de la fréquence des orages favorisée par le gradient de température plus important existant, il y a 18 000 ans, entre l'Antarctique et les régions tropicales). Une étude de la corrélation entre la teneur en aluminium (considérée en quelque sorte comme un indicateur de la circulation longue distance) et la teneur en HNO_3 de la neige déposée durant le D.M.G. devrait permettre de distinguer les deux hypothèses précédentes. Une forte corrélation entre Al et HNO_3 suggérerait plutôt un effet de transport. Pour mener à bien une telle étude, nous suggérons plutôt le site de Byrd que celui du Dôme C où, comme nous l'avons fait remarquer précédemment, l'évaluation de HNO_3 sera toujours malaisée.

5.2. EVOLUTION DE LA TENEUR EN ACIDE SULFURIQUE

Dans tous les sites étudiés, la teneur en sulfate augmente durant le D.M.G. d'un facteur allant de 1,5 à Byrd à 2,5 au Dôme C. La teneur en acide sulfurique a été évaluée dans les différents sites à l'aide de l'équation (35) (voir paragraphe 5). Le tableau 56 fait apparaître pour chaque site une augmentation de la teneur en acide sulfurique entre le D.M.G. et l'holocène, le facteur d'augmentation étant plus marqué à D 10 qu'à Dôme C et Byrd. Il faut remarquer que les valeurs de ce facteur correspondent sensiblement aux diminutions observées sur les taux d'accumulation durant les mêmes périodes de temps. Le dépôt sec de H_2SO_4 mis en évidence au paragraphe 3.1.1.2. (chapitre 4) ne nous permet pas d'interpréter directement ces facteurs en terme de changement de charge en aérosol sulfurique. Les flux de retombées d'acide sulfurique obtenus pour le dernier maximum glaciaire ne semblent pas avoir augmenté par rapport à la période holocène, à l'exception du cas de D10 (voir tableau 57). Sur la figure 96 nous constatons même plutôt l'effet inverse. Cette observation suggère tout d'abord que l'activité volcanique moyenne n'était pas plus marquée il y a 18000 ans. Cette conclusion est en bon accord avec celle de Petit et al. 1981 qui ne mettent pas en évidence une fréquence d'apparition plus importante de verres volcaniques dans la glace de la dernière glaciation. Il est toutefois important de rappeler le caractère non continu de nos mesures (un échantillon tous les 20 mètres environ, soit tous les 700 ans). Ceci ne signifie nullement qu'il n'y a pas eu de périodes d'activité volcanique intense sur des périodes de temps de quelques dizaines ou quelques centaines d'années. Si l'on voulait comparer de manière précise la fréquence des éruptions volcaniques survenues dans le passé lointain, il serait indispensable d'effectuer des mesures en continu. La technique la mieux adaptée pour ce genre d'étude est la conductivité "solide" comme nous l'avons discuté au paragraphe 3.2.2., chapitre 4.

Le cas de D10 doit être traité à part, car l'augmentation du flux de retombées observé en ce site peut avoir des causes diverses. On peut écarter l'hypothèse d'une très importante diminution du taux d'accumulation durant le D.M.G. en ce site. En effet, la figure 96 suggère un taux d'accumulation voisin de 5 g H_2O /an, ce qui donnerait par extrapolation

Sites et périodes considérés		Concentration Moyenne de H_2SO_4 (en $\mu \text{Eq.l}^{-1}$)	Accumulation (g $\text{H}_2\text{O}/\text{an}$)	Φ (kg/km ² /an)
DOME C	Holocène (0-360 m)	1,24	3,4	2,0
	Dernier maximum glaciaire (520-689 m)	1,45	1,7-2,6	1,2-1,8
VOSTOK	Holocène (0-250 m)	1,3	2,2	1,3
	Dernier maximum glaciaire (360-550 m)	N.D.	1,1	N.D.
B Y R D	Holocène (0-1050 m)	0,58	13	3,63
	Dernier maximum glaciaire (1350-1700 m)	0,76	9	3,29
D 10	Holocène (197-208 m)	0,58	20 - 30	5,6 - 8,3
	Dernier maximum glaciaire (212-245 m) ?	1,13	10 - 15	5,4 - 8,1

Tableau 57 : Flux de retombées moyen de H_2SO_4 en différents sites de l'Antarctique sur la période holocène et le dernier maximum glaciaire.

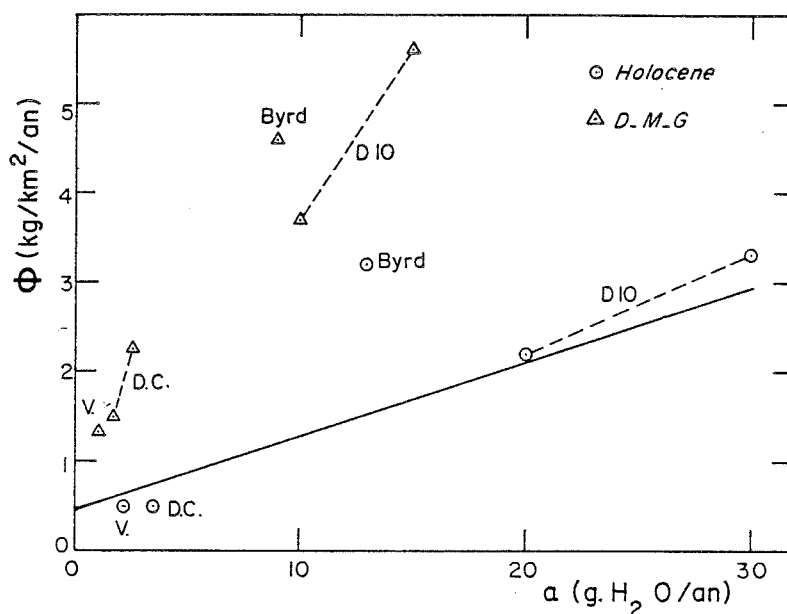


Figure 94 : Flux de retombées de sodium durant l'Holocène et le D.M.G.

La droite en traits pleins représente la relation linéaire

$$\Phi = f(a) \text{ obtenue sur la période 1959-1969, pour}$$

l'Antarctique de l'Est.

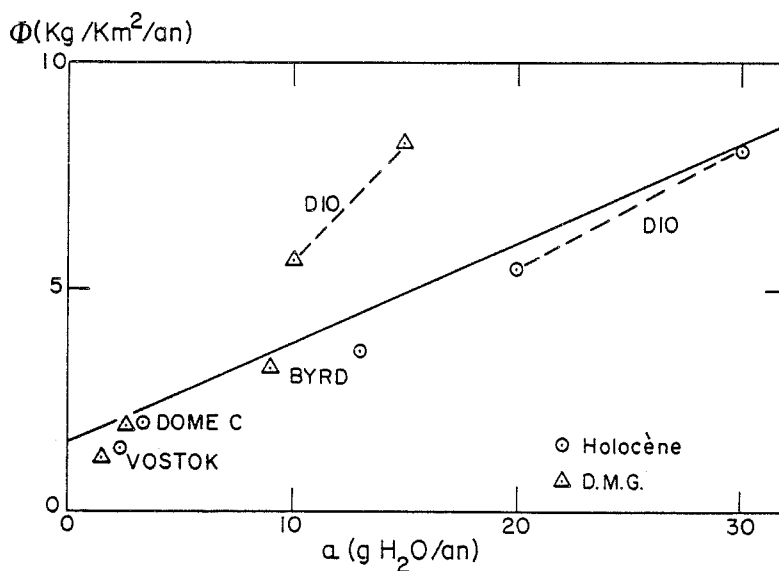


Figure 96: Flux de retombées d'acide sulfurique. Pour le site de DIO (trait en pointillé) nous avons pris une accumulation de 10-15 $\text{g H}_2\text{O}/\text{an}$, par analogie avec les autres sites (réduction de 50% de la valeur entre l'Holocène et le D.M.G.). La droite en trait plein représente la relation linéaire $\Phi = f(a)$ obtenue sur la période 1959-1969.

sur la figure (95) un flux de retombée d'aluminium négatif. L'autre hypothèse, basée sur une augmentation de la charge atmosphérique en H_2SO_4 durant le D.M.G., suggère dans ce cas que la source est située au niveau du sol puisqu'une telle augmentation n'est pas observée dans les sites centraux. Une augmentation des teneurs en H_2SO_4 de l'atmosphère peut être la conséquence d'une productivité marine plus élevée en composés soufrés gazeux ou d'un transport plus efficace de ces composés depuis leur source. L'homogénéité des teneurs en H_2SO_4 d'origine non volcanique (essentiellement l'activité biogénique à la surface des océans, voir paragraphe 3.1.4. chapitre 4) observée pour toutes les zones antarctiques étudiées semble alors contradictoire avec les retombées plus marquées à D10 durant le D.M.G. Mais le problème est en fait plus complexe car l'homogénéité a été établie pour les conditions climatiques actuelles et sur des distances de l'ordre de 1000 km (Dumont d'Urville-Dôme C), elle n'est plus nécessairement vraie durant le D.M.G. où la glace de mer couvrirait l'océan sur une distance plus grande (1000 km environ).

Notre étude a permis de montrer que durant la dernière période froide, l'activité volcanique n'était pas en moyenne plus importante, une augmentation de l'activité biogénique marine n'étant pas à exclure.

5.3. EVOLUTION DE LA TENEUR EN ACIDE CHLORHYDRIQUE

Comme nous l'avons montré au paragraphe 4.3., chapitre 3, la présence d'acide chlorhydrique correspond à des rapports Cl/Na supérieurs à la valeur de l'eau de mer. Compte tenu des erreurs analytiques sur les mesures de chlore et de sodium, il a été montré (figure 49) que durant le D.M.G. le rapport Cl/Na pouvait être considéré comme identique au rapport marin, et ce, quel que soit le site considéré.

Ceci nous amène à conclure que l'acide chlorhydrique n'est pas présent en quantité significative dans la glace du D.M.G. Durant l'holocène, la situation est sensiblement la même sauf au Dôme C où, à certaines époques de l'holocène, on a pu mettre en évidence des retombées très nettes d'acide chlorhydrique.

5.4. CONCLUSIONS

Cette étude a montré que contrairement aux aérosols marins et terrigènes, l'aérosol secondaire, dont le proton est un bon indicateur, évolue peu au cours du dernier grand changement climatique. La faible augmentation de l'acidité généralement observée durant la dernière période glaciaire semble être liée d'abord à une variation de la teneur en acide nitrique à laquelle vient s'ajouter dans le cas précis de D 10 une augmentation de la teneur en acide sulfurique. L'interprétation de ces variations faibles demeure toutefois encore délicate. En particulier, nous ne pouvons séparer clairement les effets du transport de ceux liés aux variations d'intensité des sources.

CONCLUSIONS

Nous nous étions fixés comme objectif l'étude des éléments traces solubles contenus dans les neige et glace Antarctiques. Notre intention première visait surtout à comprendre la chimie de la précipitation actuelle de façon beaucoup plus générale que ce qui avait été fait dans le passé. Nous verrons que nous avons dépassé ce stade et commencé à interpréter la chimie de la précipitation datant de la dernière glaciation.

Les problèmes liés à la contamination des échantillons ont par le passé trop souvent jeté un doute sur la validité des résultats. Nous pensons avoir maîtrisé la qualité des échantillons aussi bien de névé que de glace, ce qui nous a permis de mesurer des échantillons prélevés soit directement dans des puits soit "recarottés" à partir de carotages dans le névé (matériau poreux) ou dans la glace (matériau étanche). De ce travail préliminaire mais essentiel en est résulté la possibilité pour nous d'exploiter un échantillonnage beaucoup plus vaste que ce qui avait pu être fait antérieurement (plus de mille échantillons ont été traités).

Deux techniques analytiques, la chromatographie ionique et la titration acide, que nous avons adaptées à l'étude des traces, ont permis la détermination dans chaque échantillon des ions Na^+ , NH_4^+ , K^+ , H^+ , (et parfois Ca^{++} et Mg^{++}), Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--} . Si on examine les résultats obtenus, nous pouvons en retirer les grandes lignes directrices suivantes:

☆ Chimie de la précipitation

La partie soluble des impuretés (qui représente près de 90% de la masse totale) de la neige antarctique est essentiellement représentée par les ions Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--} . A partir de nos mesures, nous avons pu pour la première fois vérifier le nécessaire équilibre entre les concentrations anioniques et cationiques. Ceci nous a permis de dresser le catalogue des composés chimiques solubles susceptibles d'être présents dans la neige. Dans les conditions climatiques actuelles, la neige antarctique contient pour l'essentiel du sel de mer et des acides minéraux (H_2SO_4 , HNO_3 et parfois HCl). Cependant durant la dernière glaciation, la

chimie de la précipitation est caractérisée par une fraction insoluble beaucoup plus importante qu'actuellement (50 % du total en masse), aux composés solubles précédents venant s'ajouter des sulfates et des nitrates de calcium et de magnésium.

☆ Acidité de la précipitation

La variation géographique observée sur les teneurs mesurées montre que lorsque l'on s'éloigne de la zone côtière, la teneur en sel de mer décroît très rapidement ; à partir de 1500-2000 m d'altitude la précipitation est alors essentiellement dominée par les composés acides cités plus haut. La contribution des acides organiques à l'acidité totale reste quant à elle très limitée. Par ailleurs, contrairement à d'autres études, nos valeurs d'ammonium démontrent clairement l'absence de neutralisation notable de l'acidité de la précipitation. Mais notre étude permet d'aller plus loin et d'interpréter l'acidité de la précipitation en termes d'origines et de sources.

L'acide sulfurique est l'acide le plus fréquemment rencontré. Il est en effet présent en quantité significative à tous les sites et quelle que soit la période de temps considérée. Ce "bruit de fond d'acide sulfurique" a été interprété comme étant essentiellement lié à l'activité biogénique marine. Le volcanisme explosif constitue une autre source d'acide sulfurique parfois très importante, mais à caractère très ponctuel dans le temps.

Malgré le nombre élevé des valeurs maintenant disponibles, l'origine des composés azotés (essentiellement l'acide nitrique) dans les précipitations polaires reste encore assez mal définie. Nos résultats montrent que la haute atmosphère (source très souvent proposée) n'est pas une source suffisante pour rendre compte des teneurs observées. La source majeure de ce composé semble plutôt être la fixation de l'azote dans les cellules orageuses aux latitudes tempérées avec un transport à longue distance dans la troposphère supérieure. Par contre, nos résultats permettent d'éliminer certaines causes fréquemment avancées comme les cycles solaires ou les tests nucléaires pour expliquer les fluctuations observées en régions polaires.

Nous avons parfois identifié de l'acide chlorhydrique dans la précipitation des régions centrales de l'Antarctique (et ceci associé à des rapports Cl/Na très supérieurs au rapport de l'eau de mer). L'étude des variations spatio-temporelles de ce rapport dans la précipitation nous a amenés à proposer qu'au cours de son transport au-dessus du continent antarctique, le sel de mer subissait une attaque par H_2SO_4 avec libération d'acide chlorhydrique.

☆ Transferts air-neige

Nos résultats ont également permis d'aborder le problème des mécanismes de dépôt des impuretés en régions polaires. Sur des couches de neige, couvrant exactement la même séquence de temps, collectées en différents sites de l'Antarctique, l'étude détaillée des flux de retombées a permis d'appréhender quantitativement les modes de dépôt des impuretés étudiées dans la neige.

Pour le sel de mer et l'acide sulfurique l'importance du dépôt sec dans les régions à faible taux d'accumulation est démontrée. De plus cette étude montre l'homogénéité des retombées d'acide sulfurique pour l'ensemble du continent Antarctique, alors que le sel de mer semble retomber préférentiellement en Antarctique de l'Ouest.

Par contre, en ce qui concerne les acides nitrique et chlorhydrique, la forte variabilité géographique de leur teneur empêche dans le cadre de cette seule étude des flux de retombées, de cerner les mécanismes de dépôt.

☆ Paléovolcanisme

L'identification des composés chimiques présents dans la neige nous permet de présenter un profil de la teneur effective en acide sulfurique. Le caractère univoque de ce profil (par comparaison à un simple profil de sulfate) nous a amenés à étudier dans le détail le paléovolcanisme des 250 dernières années. Si les traces des trois plus importantes éruptions volcaniques de cette période sont bien révélées par notre profil, nos résultats mettent aussi en évidence une autre éruption volcanique très importante (probablement celle du Galunggung en 1822) qui n'était pas aussi bien identifiée dans les catalogues volcaniques publiés. Cette étude a fourni, sur le plan purement glaciologique, un excellent outil de datation des couches de neige sur les 160 dernières années. Enfin l'étude des flux de retombées a permis de proposer un classement des différentes éruptions volcaniques en terme de charge en acide sulfurique de la stratosphère, fournissant ainsi des données nouvelles susceptibles de faire avancer significativement le problème de la relation "volcanisme-climat".

☆ Impact de la dernière glaciation

Notre étude des forages profonds a pleinement confirmé l'hypothèse déjà avancée d'une profonde modification de la circulation atmosphérique

survenue durant la dernière période glaciaire. L'accentuation très nette de la circulation zonale a entraîné une importante augmentation de la charge en aérosols marins et terrigènes durant cette période. Par contre la charge en impuretés issues de la conversion de certains gaz traces atmosphériques ne semble pas avoir été modifiée dans de telles proportions. Cependant la complexité de la chimie de la précipitation de cette époque fait que sur ce sujet nous nous sommes limités à jeter des bases. Il est certain que la compréhension globale de toutes les modifications survenues sur l'aérosol atmosphérique nécessite encore un important travail dans les années à venir.

Cette étude nous permet donc de considérer l'aérosol des régions centrales de l'Antarctique comme bien représentatif de l'aérosol de bruit de fond sinon global du moins hémisphérique.

Après avoir passé en revue tout ce que nous estimions avoir fait avancer notablement, il nous faut reconnaître que certains points n'ont pas pu être totalement élucidés.

Un point important reste obscur dans l'étude de la relation "air-neige", il s'agit des cas de HCl et HNO_3 . Ces deux composés sont présents dans l'atmosphère à l'état gazeux et se retrouvent piégés dans les couches de neige. Beaucoup reste à faire pour comprendre les mécanismes de ce piégeage. Il serait en particulier intéressant de mener des études simultanées de la neige de l'aérosol mais aussi des gaz traces atmosphériques, ces études nécessitant des mesures en continu (été comme hiver) dans une station du haut plateau antarctique.

La recherche du paléovolcanisme sur les 250 dernières années a été concluante ; il reste maintenant à l'étendre à d'autres séquences de temps. De plus les mesures de conductivité solide que nous avons menées parallèlement à ce travail, ont donné des résultats très encourageants, ceci maintenant doit permettre la réalisation d'un enregistrement continu des accidents volcaniques sur les quelques dizaines de milliers d'années que couvrira le prochain forage profond.

Enfin dans le cadre de la reconstitution de l'environnement atmosphérique passé de la Terre nous avons débuté l'étude glaciochimique d'un cycle climatique complet (150.000 ans sur la carotte de Vostok). Nous comptons de plus mener une étude fine des différentes transitions climatiques.

LISTE DES FIGURES

- 1 - Courbe d'étalonnage de l'acidité.
- 2 - Schéma de fonctionnement du chromatographe à ions.
- 3 - Principe d'analyse d'un mélange de cations.
- 4a - Chromatogrammes obtenus pour les cations monovalents et divalents.
- 4b - Chromatogrammes obtenus pour les anions avec une colonne de neutralisation à résine.
- 4c - Chromatogrammes obtenus pour les anions avec une colonne de neutralisation à "fibres creuses" et une colonne de préconcentration.
- 5a - Courbes d'étalonnages de l'ammonium et du sodium.
- 5b - Courbes d'étalonnages du potassium et du chlore.
- 5c - Courbes d'étalonnages du nitrate et du sulfate.
- 5d - Courbes d'étalonnages du calcium et du magnésium.
- 5e - Courbes d'étalonnages du formiate, de l'acétate et du fluor.
- 6 - Intercalibration des mesures de calcium et de magnésium par absorption atomique et par chromatographie ionique.
- 7 - Intercalibration des mesures de chlore par activation neutronique et par chromatographie ionique.
- 8 - Evolution de la teneur en ammonium au cours du temps dans une solution laissée à l'air libre dans une "hotte sans poussière".
- 9 - Teneurs en ammonium de deux séries d'échantillons de neige collectées côte à côte, la série (b) ayant subi une fusion accidentelle.
- 10 - Mesures successives de la teneur en ammonium effectuées sur des échantillons de glace antarctique.
- 11 - Dispositif utilisé pour le recarottage du névé.
- 12 - Comparaison de trois types de prélèvements effectués sur les couches de neige déposées entre 2,30 et 2,80 m de profondeur au Dôme C.
- 13 - Profils de sodium, chlore et excès de chlore (ou excès de sodium) obtenus sur deux séries de carottes prélevées entre 2,50 et 10,00 m au Dôme C.
- 14 - Profils de nitrate, sulfate, acidité, ammonium et potassium mesurés sur deux séries de carottes entre 2,50 et 10,00 m au Dôme C.

- 15 - Sonde thermique utilisée pour le recarottage des carottes de glace.
- 16 - Décontamination d'un morceau de glace (359 m au Dôme C) par "fusion-lavage" à l'eau ultrapure.
- 17 - Antarctique : sites de prélèvements.
- 18 - Charge ionique Σ (somme des anions et cations), déséquilibre ΔC observé entre cations et anions dans la neige déposée au Pôle Sud entre 1959 et 1969 (A), entre 1949 et 1954 (B).
- 19 - Σ et ΔC pour la neige du Dôme C entre 0,76 et 1,75 m de profondeur (période 1962-1973).
- 20 - Σ et ΔC pour la neige de D 80 entre 4 et 16 m de profondeur (période 1953-1975).
- 21 - Σ et ΔC pour les échantillons de neige de surface prélevés sur les quatre cents premiers kilomètres de l'axe Dumont d'Urville - Dôme C.
- 22 - Σ et ΔC pour la neige du Dôme C entre 2 et 16 m de profondeur (période 1780-1959).
- 23 - Constitution moyenne de la partie soluble des impuretés en quatre sites différents de l'Antarctique, pour la période 1959-1969.
- 24 - Diagramme de reconstitution de l'acidité à D 80, Dôme C et Pôle Sud (période 1959-1969).
- 25 - Contribution relative des trois acides minéraux HCl , HNO_3 et H_2SO_4 à l'acidité totale (diagramme triangulaire) pour différents sites.
- 26 - Constitution moyenne de la partie soluble et diagramme de reconstitution de l'acidité au Dôme C sur la période 1860-1880.
- 27 - Comparaison des teneurs en sodium obtenues par chromatographie ionique (C.I.) avec le sodium total (mesuré par activation neutronique, A.N.) et avec le sodium marin, en fonction de la charge en poussières d'origine terrigène (Aluminium) le long de la carotte 905 m du Dôme C.
- 28 - Evolution de la charge ionique (Σ) et du déséquilibre entre cations et anions (ΔC_1 puis ΔC_2 , voir texte) en fonction de la teneur en aluminium sur la carotte du Dôme C.
- 29 - Evolution de la charge ionique (Σ) et du déséquilibre entre cations et anions (ΔC_1 puis ΔC_2 , voir texte) en fonction de la teneur en aluminium sur la carotte 950 m de Vostok.
- 30 - Evolution de la charge ionique (Σ) et du déséquilibre entre cations et anions (ΔC_1 puis ΔC_2 , voir texte) en fonction de la teneur en aluminium sur la carotte de D10.

- 31 - Evolution de la charge ionique (Σ) et du déséquilibre entre cations et anions (ΔC_1 puis ΔC_2 , voir texte) en fonction de la teneur en aluminium sur la carotte de Byrd.
- 32 - Constitution moyenne de la partie soluble pour les échantillons pris entre 510 et 680 mètres dans la carotte 905 m du Dôme C.
- 33 - Les trois reconstitutions possibles de l'acidité de la glace (entre 510 et 680 m au Dôme C).
- 34 - Variation de l'excès de calcium et des teneurs en gaz carbonique le long de la carotte 905 m du Dôme C.
- 35 - Variations de la teneur en nitrate et de la conductivité "solide" le long de la carotte 905 m du Dôme C.
- 36 - Variations des concentrations en Na^+ , Cl^- , K^+ et NH_4^+ et du rapport Cl/Na sur les 400 premiers kilomètres de l'axe Dumont d'Urville-Dôme C.
- 37 - Variations du flux de retombées annuel de sodium en Terre Adélie en fonction de l'altitude et du taux d'accumulation du site.
- 38 - Evolution de Na^+ , Cl^- , Cl/Na et Cl^-_{ex} (respectivement Na^+_{ex}) dans la neige déposée entre 1959 et 1969 à D 55.
- 39 - Evolution de Na^+ , Cl^- , Cl/Na et Cl^-_{ex} (respectivement Na^+_{ex}) dans la neige déposée entre 1959 et 1969 à D 80.
- 40 - Variations des teneurs en ions majeurs entre 0,77 et 2,40 mètres de profondeur au Dôme C.
- 41 - Evolution de Na^+ , Cl^- , Cl/Na et K^+ dans la neige déposée entre 1959 et 1969 au Pôle Sud.
- 42 - Variations du flux de retombées annuel moyen de sodium entre 1959 et 1969 pour différents sites de l'Antarctique de l'Est, en fonction de l'altitude et du taux d'accumulation.
- 43 - Variations du flux de retombées annuel moyen de sodium sur la période holocène (0 à 10 000 B.P.) pour trois sites de l'Antarctique de l'Est (Terre Adélie, Dôme C, Vostok) et un site de l'Antarctique de l'Ouest (Byrd), en fonction du taux d'accumulation.
- 44 - Variations de Na^+ , Cl^- et Cl/Na pour la neige déposée au Pôle Sud entre 1949 et 1953.

- 45 - Signaux saisonniers moyens obtenus pour les différents ions étudiés (Na^+ , Cl^- , NH_4^+ , K^+ , H^+ , NO_3^- et SO_4^{--}), le rapport Cl/Na et la teneur en deutérium ($\delta\text{D} \text{ ‰}$) au Pôle Sud : (A) pour la période 1949-1953, (B) pour la période 1959-1969.
- 46 - Variations des flux de retombées annuels moyens de chlore entre 1959 et 1969 pour différents sites de l'Antarctique de l'Est, en fonction du taux d'accumulation.
- 47 - Rapport Cl/Na et reconstitution de l'acidité au Dôme C entre 0 et 9,50 m de profondeur (période 1860-1980).
- 48 - Profils d'ions majeurs (Na^+ , Cl^- , SO_4^{--} , H^+ , NO_3^- , NH_4^+ et K^+) entre 0 et 9,50 m de profondeur au Dôme C.
- 49 - Evolution du rapport Cl/Na_m de la neige au cours du dernier grand changement climatique à Dôme C, Vostok, Byrd et D 10.
- 50 - Variations saisonnières de la quantité de chlore en excès présente dans le névé au Pôle Sud (période 1949-1953 soit entre 5 et 6 m de profondeur).
- 51 - Variations des concentrations en H^+ , NO_3^- , SO_4^{--} et $\text{SO}_4^{--}\text{ex}$ sur les quatre cents premiers kilomètres de l'axe Dumont d'Urville-Dôme C.
- 52 - Relation entre le flux de retombées annuels d'acide sulfurique en Terre Adélie en fonction du taux d'accumulation (A), de l'altitude (B) du site.
- 53 - Evolution de NO_3^- et SO_4^{--} dans la neige déposée entre 1959 et 1969 à D 55.
- 54 - Evolution de H^+ , NO_3^- et SO_4^{--} dans la neige déposée entre 1959 et 1969 à D 80.
- 55 - Evolution de NO_3^- , SO_4^{--} , H^+ et NH_4^+ dans la neige déposée entre 1959 et 1969 au Pôle Sud, la courbe du haut (teneur en deutérium, δD) est de Jouzel et al. 1983.
- 56 - Variations du flux de retombées moyen annuel d'acide sulfurique entre 1959 et 1969 pour différents sites de l'Antarctique de l'Est, en fonction de l'altitude et du taux d'accumulation.
- 57 - Variations du flux de retombées moyen d'acide sulfurique en fonction du taux d'accumulation sur la période holocène.
- 58 - Variations de NO_3^- , SO_4^{--} et NH_4^+ pour la neige déposée au Pôle Sud entre 1949 et 1953, la courbe du haut (teneur en deutérium, δD) est de Jouzel et al. 1983. La courbe du bas représente en traits pleins l'acidité mesurée, la courbe en pointillé l'acidité calculée (voir chapitre 3).
- 59 - Signaux saisonniers moyens obtenus sur la période 1959-1969 (A) et 1949-1953 (B) pour la teneur en deutérium, en sulfate et en acide sulfurique.
- 60 - Teneur en sulfate en excès et en acide sulfurique de la neige déposée au Dôme C entre 1760 et 1972.

- 61 - Deux exemples d'identification très difficile de la teneur en acide sulfurique de la neige (Dôme C) à partir des seuls profils de sulfate et d'acidité.
- 62 - Deux interprétations extrêmes du profil stratigraphique (entre 0 et 10 mètres de profondeur au Dôme C), sur lesquels sont reportés les niveaux Agung, Krakatoa et Tambora.
- 63 - Variations des teneurs en ions majeurs entre 10,00 et 15,66 mètres de profondeur au Dôme C.
- 64 - Comparaison des teneurs en sulfate obtenues à partir de demi-carottes en mauvais état (courbe en trait plein) et de carottes entières (courbe en pointillé), au Dôme C.
- 65 - Evolution de la teneur en acide sulfurique de la neige du Dôme C, comparaison avec les éruptions volcaniques au sud du 20°N (V.E.I. ≥ 4 ou d.v.i. > 400).
- 66 - Densité ρ et densité ρ_c au Dôme C pour la neige de surface.
- 67 - Comparaison des profils de conductivité "solide" (unité relative) et de conductivité liquide sur le forage PS₂ (Pôle Sud).
- 68 - Comparaison des deux seuls signaux importants obtenus en conductivité "solide" sur sept forages réalisés dans un rayon de 10 km autour de la base du Pôle Sud.
- 69 - Définitions des variables d_i , c_i et c_o utilisées pour évaluer la masse de produits volcaniques déposés (voir équation 29).
- 70 - Signal volcanique (en H₂SO₄) obtenu après l'éruption de l'Agung en différents sites de l'Antarctique.
- 71 - Signal volcanique obtenu après l'éruption du Tambora à Dôme C, Pôle Sud et D 57.
- 72 - Signal volcanique obtenu après l'éruption du Galunggung à Dôme C, Pôle Sud et D 57.
- 73 - Variations de la masse (Φ) d'acide sulfurique déposée en Antarctique en fonction du taux d'accumulation après l'éruption de l'Agung.
- 74 - Variations de la masse (Φ) d'acide sulfurique déposée en Antarctique en fonction du taux d'accumulation après l'éruption du Tambora.
- 75 - Variations de la masse (Φ) d'acide sulfurique déposée en Antarctique en fonction du taux d'accumulation après l'éruption du Galunggung.
- 76 - Relation entre la masse d'acide sulfurique déposée au Dôme C et le d.v.i. correspondant pour les principaux événements des 200 dernières années.
- 77 - Signaux volcaniques en H₂SO₄ pour les principaux événements volcaniques enregistrés dans la neige du Dôme C sur les 200 dernières années.

- 78 - Variations du flux de retombées annuel de nitrate en Terre Adélie en fonction du taux d'accumulation (A), de l'altitude du site (B).
- 79 - Variations du flux de retombées moyen annuel de nitrate entre 1959 et 1969 pour différents sites de l'Antarctique de l'Est, en fonction de l'altitude et du taux d'accumulation.
- 80 - Concentration en nitrate pour différents sites de l'Antarctique obtenue pour la période 1959-1969 et la période holocène.
- 81 - Variations des concentrations et des flux de retombées de nitrate au Pôle Sud en fonction du cycle solaire (période 1959-1969).
- 82 - Courbe de reconstitution de l'acidité à D 55 et D 80 (période 1959-1969).
- 83 - Courbe de reconstitution de l'acidité au Dôme C et au Pôle Sud (période 1959-1969).
- 84 - Profils de Na^+ , Cl^- , $\text{Cl}^-/\text{Na}_m^+$, K^+ et Mg^{++} le long de la carotte de 905 m du Dôme C.
- 85 - Profils de Al , Ca^{++} , SO_4^{--} , H^+ , NO_3^- et NH_4^+ le long de la carotte du Dôme C.
- 86 - Constitution moyenne de la partie soluble des impuretés pour les quatre stades climatiques couverts par la carotte du Dôme C.
- 87 - Evolution de la charge en impuretés d'origine marine (A), terrigène (B) et issues de la conversion gaz-particules (C) au cours des quatre stades climatiques.
- 88 - Profils de K^+ , Na^+ , Cl^- et Cl/Na_m le long de la carotte 950 m de Vostok, le profil isotopique (Gordienko et al. 1982) met en évidence le changement climatique survenu il y a 10-15 000 ans.
- 89 - Profils de NO_3^- , SO_4^{--} , H^+ , NH_4^+ et Al le long de la carotte 950 m de Vostok.
- 90 - Profils de Na^+ , Cl^- et Cl/Na_m le long des 300 m du forage D10. La courbe isotopique indique le grand changement climatique (208-215 m) (Raynaud et al. 1979).
- 91 - Profils de NO_3^- , SO_4^{--} , H^+ et NH_4^+ le long des 300 m du forage D10. La courbe en pointillé représente la teneur en SO_4^{--} ex.
- 92 - Profils de NH_4^+ , K^+ , Cl/Na_m , Cl^- et Na^+ le long de la carotte de Byrd (2150 m).
- 93 - Profils de SO_4^{--} , NO_3^- et H^+ le long de la carotte de Byrd (Palais et Legrand 1985).
- 94 - Flux de retombées de sodium durant le dernier maximum glaciaire.
- 95 - Comparaison des flux de retombées d'aluminium entre la période holocène et le D.M.G.
- 96 - Flux de retombées d'acide sulfurique sur la période holocène et le D.M.G.
- 97 - Evolution des teneurs en nitrate au Dôme C sur les 200 dernières années.

LISTE DES TABLEAUX

- 1 - Conditions de travail sur les chromatographes à ions Dionex 10 et sur le 2010 i.
- 2 - Estimation de la précision d'une mesure.
- 3 - Comparaison de différentes techniques analytiques utilisées pour la mesure des ions dans la précipitation polaire.
- 4 - Les différentes possibilités d'obtention d'échantillons non contaminés en fonction de la gamme de profondeur considérée.
- 5 - Caractéristiques géographiques des différents sites étudiés ainsi que les échelles couvertes par nos échantillonnages.
- 6 - Table de conversion des $\mu\text{Eq.l}^{-1}$ en ng.g^{-1} .
- 7 - Rapport entre éléments (ou composés) dans l'eau de mer.
- 8 - Bilan ionique moyen de la neige déposée à D 55, D 80, Dôme C et Pôle Sud durant la période 1959-1969.
- 9 - Comparaison des teneurs en ions majeurs obtenues dans notre travail avec celles des études antérieures les plus récentes.
- 10 - Contribution(en %) des trois acides minéraux à l'acidité totale pour la neige déposée entre 1959 et 1969 en quatre sites de l'Antarctique.
- 11 - Evaluation de la contribution des impuretés d'origine terrigène à la partie soluble sur un échantillon à 574 m de profondeur de la carotte du Dôme C.
- 12 - Contribution moyenne de la partie soluble des impuretés contenue dans les échantillons compris entre 510 et 680 m (glace) au Dôme C.
- 13 - Valeurs observées pour les rapports entre Na, Cl, K, Mg et Ca dans la neige des régions côtières de Terre Adélie.
- 14 - Rapports K/Na , Mg/Na , Cl/Na obtenus sur la carotte du Dôme C pour deux périodes de temps différentes.
- 15 - Teneur en aluminium obtenue par différents auteurs pour des couches de neige similaires à celles que nous étudions et évaluation de la concentration de sodium terrigène en résultant.
- 16 - Evaluation des flux de retombées moyens de sodium et de chlore dans la neige de surface, collectée sur les 400 premiers kilomètres de l'axe Dumont d'Urville-Dôme C.
- 17 - Caractérisation de la neige déposée entre 1959 et 1969 en quatre sites géographiquement différents en Antarctique de l'Est.
- 18 - Evaluation du flux de retombées moyen en sodium pour la période holocène.
- 19 - Comparaison des rapports de concentrations de sodium entre été et hiver dans l'aérosol (Cunningham et Zoller, 1981) et dans la neige (ce travail) pour la station Pôle Sud.

- 20 - Résultats obtenus en sodium et en chlore sur la période 1970-1973 à D 80, dans ce travail et dans une étude antérieure (Briat et al. 1974).
- 21 - Comparaison des résultats obtenus dans ce travail au Pôle Sud avec des études antérieures pour le sodium et le chlore.
- 22 - Estimation des flux annuels d'émission des différentes sources potentielles de HCl.
- 23 - Evaluation des flux de retombées annuels d'acide sulfurique en différents sites de l'Antarctique de l'Est.
- 24 - Evaluation du flux de retombées moyen d'acide sulfurique pour la période holocène.
- 25 - Comparaison des rapports de concentrations en acide sulfurique entre été et hiver dans l'aérosol et dans la neige pour la station Pôle Sud.
- 26 - Estimations des émissions des principales sources de composés soufrés (d'après Ivanov et Freney 1984).
- 27 - Evaluation du flux de retombées annuel de sulfate provenant de la couche de Junge en période non volcanique.
- 28 - Eruptions volcaniques survenues, dans l'hémisphère Sud et dans la zone équatoriale Nord (0 à 20°N), entre 1759 et 1978, dont le V.E.I. est supérieur ou égal à 5 (Newhall et Self, 1982).
- 29 - Eruptions volcaniques survenues dans l'hémisphère Sud et dans la zone équatoriale Nord (0 à 10°N) entre 1759 et 1978, dont le d.v.i. est supérieur ou égal à 400 (Lamb 1970).
- 30 - Identification des différents événements enregistrés dans la neige déposée au Dôme C durant les 200 dernières années.
- 31 - Estimation des émissions d'HCl et H_2SO_4 lors des éruptions de l'Agung, du Krakatoa et du Tambora d'après Devine et al. 1984.
- 32 - Comparaison des profondeurs en neige des deux plus importants événements décelés le long du forage PS₁₄ (Pôle Sud) avec les profondeurs estimées des couches 1816 et 1823.
- 33 - Taux d'accumulation annuels obtenus sur les sept forages du Pôle Sud à partir des horizons repères Tambora et Galunggung.

- 34 - Valeurs du taux d'accumulation annuel en amont de D 57.
- 35 - Evaluation des retombées d' H_2SO_4 après l'éruption de l'Agung (1963), en différents sites de l'Antarctique.
- 36 - Evaluation des retombées d' H_2SO_4 après l'éruption du Tambora, en différents sites de l'Antarctique.
- 37 - Evaluation des retombées d' H_2SO_4 après l'éruption du Galunggung en différents sites de l'Antarctique.
- 38 - Relation entre la masse de produits volcaniques (H_2SO_4) déposés et le taux d'accumulation annuel, pour l'Agung et le Tambora.
- 39 - Comparaison du taux de retombées sèches pour les débris volcaniques (H_2SO_4) et pour d'autres impuretés.
- 40 - Estimation de la répartition interhémisphérique du dépôt de produits volcaniques après les éruptions du Mont Agung et du Tambora.
- 41 - Comparaison de notre estimation du dépôt avec les émissions proposées par différents auteurs pour l'Agung et le Tambora.
- 42 - Evaluation de la masse d'acide sulfurique volcanique déposée dans la neige du Dôme C après les différentes éruptions volcaniques.
- 43 - Flux de retombées moyen annuel de HNO_3 pendant la période 1959-1969 en différents sites de l'Antarctique de l'Est.
- 44 - Flux de retombées moyen annuel de HNO_3 pendant la période holocène à D 10, Byrd, Dôme C et Vostok.
- 45 - Concentration et flux de retombées de nitrate en fonction du temps au Pôle Sud entre 1959 et 1969.
- 46 - Estimation des différentes sources de NO et NO_2 dans la troposphère.
- 47 - Evaluation du flux de retombées annuel moyen d'acide nitrique dû à l'injection stratosphérique.
- 48 - Concentrations moyennes en ions majeurs sur les échantillons correspondant au haut du forage D 10 et sur les échantillons de surface prélevés entre la côte et 33 km de la mer.
- 49 - Concentrations moyennes pour les ions majeurs dans la neige (1959-1969) en différents sites de l'Antarctique de l'Est.
- 50 - Contribution des impuretés issues du sel de mer et de la conversion gaz-particules pour la neige de différents sites de l'Antarctique de l'Est.

- 51 - Evolution des différentes composantes de la partie soluble des impuretés de la neige du Dôme C (900 m).
- 52 - Contributions des différents ions aux trois types d'impuretés.
- 53 - Evolution de la charge en impuretés marines, terrigènes et issues de la conversion gaz-particules au cours du dernier changement climatique.
- 54 - Variations de la concentration et du flux de retombées moyen de sodium marin, du rapport Cl/Na_m et de son écart à la valeur de l'eau de mer, au cours du dernier changement climatique pour Dôme C, Vostok, Byrd et D 10.
- 55 - Flux de retombées moyen d'aluminium en différents sites, sur la période glaciaire.
- 56 - Comparaison des teneurs en H^+ , NO_3^- acide et SO_4^{--} acide entre l'holocène et le D.M.G. pour Dôme C, Vostok, Byrd et D 10.
- 57 - Flux de retombées moyen de H_2SO_4 en différents sites de l'Antarctique sur la période holocène et le dernier maximum glaciaire.

ANNEXE N° 1

- A.1.1. : Etalonnage du Na^+ , NH_4^+ et K^+
- A.1.2. : Etalonnage du Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--}
- A.1.3. : Etalonnage du F^- , HCOO^- et CH_3COO^-
- A.1.4. : Etalonnage du Ca^{++} et du Mg^{++}
- A.1.5. : Estimation de l'erreur analytique au seuil 5 % pour les différents ions étudiés
- A.1.6. : Intercalibration entre la chromatographie ionique et l'absorption atomique pour Ca^{++} et Mg^{++} sur des échantillons de glace antarctique
- A.1.7. : Evolution de la concentration en NH_4^+ , dans un récipient laissé à l'air libre dans une hotte sans poussière, en fonction du temps
- A.1.8. : Comparaison de la teneur en NH_4^+ (ng.g^{-1}) dans deux séries d'échantillons prélevées côte à côte à la Station Pôle Sud
- A.1.9. : Concentrations en NH_4^+ (en ng.g^{-1}) obtenues lors de mesures successives effectuées sur des échantillons de glace provenant de la Station Vostok
- A.1.10. : Résultats de la décontamination par "fusion-lavage" effectuée sur une section de carotte du forage 905 m au Dôme C

A N N E X E 1 ---

Pour chaque élément étudié, à partir des n couples (x_i, h_i) (x_i désignant la concentration de l'étalon i , h_i la hauteur correspondante du pic), nous avons établi l'équation de la droite d'étalonnage par régression linéaire :

$$h = \bar{h} + b(x - \bar{x})$$

\bar{h} et \bar{x} désignent les valeurs moyennes observées pour h_i et x_i

$$\bar{h} = \frac{\sum h_i}{n} \quad \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Les valeurs des couples (x_i, h_i) observées sont reportées dans le tableau A.1.1. pour Na^+ , NH_4^+ et K^+ , dans le tableau A.1.2. pour Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--} , dans le tableau A.1.3. pour F^- , HCOO^- et CH_3COO^- et dans le tableau A.1.4. pour Ca^{++} et Mg^{++} .

Les fluctuations de h_i peuvent se décomposer en deux parties :

- les variations de h_i dues à la régression auxquelles on associe la variance S_1^2
- les variations de h_i auxquelles on associe la variance résiduelle S_2^2 .

Les fluctuations totales de h_i sont ainsi représentées par

$$S_y^2 = \sum_i \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n - 1}$$

Sur un échantillon de concentration x_o , la variance totale de y_o s'écrit :

$$S_{y_o}^2 = S_2^2 \left(1 + \frac{1}{n}\right) = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2 - b^2 \sum (x_i - \bar{x})^2}{(n - 2)} \left(1 + \frac{1}{n}\right)$$

L'analyse d'un échantillon de concentration inconnue x_o ayant donné la hauteur h_o , l'intervalle de confiance peut être évalué au seuil α par :

$$x_o \pm \frac{1}{b} S_{y_o} t_{1-\frac{\alpha}{2}}^{n-2} \quad (\text{loi du "t" de Student à } n-2 \text{ degré de liberté})$$

L'ensemble des différents paramètres statistiques obtenus pour chaque élément est présenté sur le tableau A.1.5.

Cas du Calcium et du Magnésium

Pour ces deux ions, l'étalonnage n'est pas linéaire et les courbes évoluent sensiblement au cours du temps comme le montrent les hauteurs h' et h obtenues en fin et en début de manipulation (tableau A.1.4.).

A partir des couples $(\frac{h_i}{x_i}, x_i)$ nous avons obtenu les équations suivantes :

Calcium

$$h = 0,00095 x^2 + 0,038 x \quad (r = 0,995)$$

et

$$h' = 0,0011 x^2 + 0,057 x \quad (r = 0,987)$$

Magnésium

$$h = 0,003 x^2 + 0,09 x \quad (r = 0,99)$$

et

$$h' = 0,004 x^2 + 0,117 x \quad (r = 0,98)$$

x_i (NH_4^+)	h_i (NH_4^+)	$(x_i - \bar{x})^2$	$(h_i - \bar{h})^2$	x_i (Na^+)	h_i (Na^+)	$(x_i - \bar{x})^2$	$(h_i - \bar{h})^2$	x_i (K^+)	h_i (K^+)	$(x_i - \bar{x})^2$	$(h_i - \bar{h})^2$
0	0,2	25,00	13,54	0	0,5	223,50	249,01	0	0,1	25,00	1,12
1	0,85	16,00	9,18	2,5	3,2	155,00	171,09	1	0,3	16,00	0,74
2	1,65	9,00	4,97	5,0	4,65	99,00	135,26	2	0,35	9,00	0,66
3	2,00	4,00	3,53	7,5	8,3	55,50	63,68	3	0,75	4,00	0,17
4	2,95	1,00	0,86	10,00	11,5	24,50	22,85	4	0,8	1,00	0,13
5	3,4	0,00	0,23	12,5	14,0	6,00	5,20	5	1,1	0,00	0,00
6	4,75	1,00	0,76	15,0	15,15	0,00 ₂	1,28	6	1,2 ₅	1,00	0,01
7	5,6	4,00	2,96	17,5	18,9	6,25	6,86	7	1,65	4,00	0,24
8	6,45	9,00	6,60	19,9	21,3	24,50	25,20	8	2,0	9,00	0,71
9	7,0	16,00	9,73	22,4	24,9	55,50	74,30	9	2,1	16,00	0,88
10	7,8	25,00	15,37	24,9	26,7	99,00	108,58	10	2,4	25,00	1,54
				27,3	30,5	153,76	202,21				
				29,8	32,1	220,52	250,27				

$$\bar{x} = 5,0 \quad \bar{h} = 3,88$$

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = 110$$

$$\sum (h_i - \bar{h})^2 = 67,73$$

$$\bar{x} = 14,95 \quad \bar{h} = 16,28$$

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = 1123,03$$

$$\sum (h_i - \bar{h})^2 = 1315,79$$

$$\bar{x} = 5,0 \quad \bar{h} = 1,16$$

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = 110$$

$$\sum (h_i - \bar{h})^2 = 6,20$$

Tableau A.1.1. Etalonnage du Na^+ , NH_4^+ et K^+ : La concentration des solutions standard (x_i) est exprimée en ng.g^{-1} , les hauteurs de pics correspondantes en cm.

x_i (Cl^-)	h_i (Cl^-)	$(x_i - \bar{x})^2$	$(h_i - \bar{h})^2$	x_i (NO_3^-)	h_i (NO_3^-)	$(x_i - \bar{x})^2$	$(h_i - \bar{h})^2$	x_i (SO_4^{--})	h_i (SO_4^{--})	$(x_i - \bar{x})^2$	$(h_i - \bar{h})^2$
0	0,2	625	36,97	0	0,0	253,45	8,76	0	0,0	12656,25	342,25
5	1,6	400	21,90	1	0,25	222,61	7,34	20	3,2	8556,25	234,09
10	2,6	225	13,54	3	0,65	166,93	5,34	40	5,5	5256,25	169,00
15	4,0	100	5,20	5	0,85	119,25	4,45	60	8,7	2756,25	96,04
20	5,6	25	0,46	7	1,1	79,57	3,46	80	12,7	1056,25	33,64
25	6,2	0	0,01	10	1,85	35,05	1,23	100	15,2	156,25	10,89
30	7,0	25	0,52	15	2,75	0,85	0,04	120	19,5	56,25	1,00
35	8,4	100	4,49	20	3,7	16,65	0,55	140	22,7	756,25	17,64
40	10,0	225	13,84	25	4,5	82,45	2,37	160	27,0	2256,25	72,25
45	11,0	400	22,28	30	5,75	198,25	7,78	180	29,5	4556,25	121,00
50	12,5	625	38,69	35	6,5	364,05	12,53	200	34,0	7656,25	240,25
				40	7,6	579,85	21,53	250	44,0	18906,25	650,25

$$\bar{x} = 25,0 \quad \bar{h} = 6,28$$

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = 2750,0$$

$$\sum (h_i - \bar{h})^2 = 157,9$$

$$\bar{x} = 15,92 \quad \bar{h} = 2,96$$

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = 2188,96$$

$$\sum (h_i - \bar{h})^2 = 75,38$$

$$\bar{x} = 112,5 \quad \bar{h} = 18,5$$

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = 64625,00$$

$$\sum (h_i - \bar{h})^2 = 1988,3$$

Tableau A.1.2 : Etalonnage du Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--} : La concentration des solutions standard (x_i) est exprimée en ng.g^{-1} , les hauteurs de pics correspondantes en cm.

x_i (F ⁻)	h_i (F ⁻)	$(x_i - \bar{x})^2$	$(h_i - \bar{h})^2$	x_i (HCOO ⁻)	h_i (HCOO ⁻)	$(x_i - \bar{x})^2$	$(h_i - \bar{h})^2$	x_i (CH ₃ COO ⁻)	h_i (CH ₃ COO ⁻)	$(x_i - \bar{x})^2$	$(h_i - \bar{h})^2$
5,3	1,8	561,9	73,44	7,2	0,45	1058,85	6,35	12,28	0,35	3220,79	3,06
10,6	3,4	338,56	48,58	14,5	0,95	637,06	4,08	25,6	0,8	1939,52	1,69
15,9	6,0	171,61	19,10	21,7	1,7	325,44	1,61	38,3	1,15	982,20	0,91
21,1	7,4	62,41	8,82	28,9	2,15	117,51	0,67	51,0	1,55	347,45	0,30
26,4	9,0	6,76	1,88	36,1	2,6	13,25	0,14	63,6	1,95	36,48	0,022
31,7	11,3	7,29	0,86	43,4	3,3	13,40	0,11	76,1	2,25	41,73	0,022
36,9	13,6	62,4	10,43	50,6	3,9	117,94	0,86	88,6	2,65	359,48	0,302
42,2	15,2	174,24	23,33	57,8	4,4	326,16	2,04	101,0	3,05	983,45	0,90
47,5	17,0	342,25	43,96	65,0	4,75	638,07	3,17	113,5	3,45	1923,70	1,82
52,7	19,0	561,69	74,48	72,2	5,5	1053,65	6,4	125,9	3,8	3165,19	2,89

$$\bar{x} = 29,0 \quad \bar{h} = 10,37$$

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = 2288,90$$

$$\sum (h_i - \bar{h})^2 = 304,88$$

$$\bar{x} = 39,74 \quad \bar{h} = 2,97$$

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = 4301,33$$

$$\sum (h_i - \bar{h})^2 = 25,43$$

$$\bar{x} = 69,64 \quad \bar{h} = 2,10$$

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = 13009,99$$

$$\sum (h_i - \bar{h})^2 = 11,934$$

Tableau A.1.3 : Etalonnage du F⁻, HCOO⁻ et CH₃COO⁻ : la concentration des solutions standard (x_i) est exprimée en ng.g⁻¹, les hauteurs de pics correspondantes en cm.

x_i (Mg^{++})	h'_i (Mg^{++})	h_i (Mg^{++})	x_i (Ca^{++})	h'_i (Ca^{++})	h_i (Ca^{++})
2,0	0,25	0,2	6,0	0,35	0,25
4,0	0,55	0,4	12,0	0,9	0,6
6,0	0,9	0,65	17,9	1,4	1,0
8,0	1,15	0,9	23,9	2,0	1,4
9,95	1,55	1,2	29,8	2,6	1,95
11,9	1,95	1,5	35,8	3,4	2,6
13,9	2,5	1,9	41,7	4,4	3,3
15,9	3,0	2,25	47,6	5,1	4,0
17,8	3,35	2,55	53,5	6,0	4,6
19,8	3,9	2,95	59,4	7,1	5,5

Tableau A.1.4 : Etalonnage du Ca^{++} et du Mg^{++} : la concentration (x_i) des solutions standard est exprimée en $ng.g^{-1}$, h et h' (en cm) représentent les hauteurs de pics au début et à la fin d'une série d'analyses.

	n	b	s_2^2	s_{yo}^2	s_{yo}	s_{xo}	$t_{0,975}^{n-2}$	précision
Na^+	13	1,0807	0,381	0,410	0,6406	0,593	2,201	1,3
NH_4^+	11	0,7818	0,055	0,060	0,245	0,313	2,262	0,7
K^+	11	0,2354	0,0116	0,0126	0,1125	0,478	2,262	1,1
Cl^-	11	0,2391	0,076	0,083	0,288	1,20	2,262	2,7
NO_3^-	12	0,1885	0,0088	0,0095	0,097	0,517	2,228	1,2
SO_4^-	12	0,1751	0,6897	0,7471	0,864	4,94	2,228	11,0
F^-	10	0,3646	0,076	0,084	0,289	0,79	2,306	1,8
HCOO^-	10	0,0768	0,0074	0,008	0,091	1,18	2,306	2,7
CH_3COO^-	10	0,0302	0,002	0,002	0,049	1,60	2,306	3,7

Tableau A.1.5 : Estimation de l'erreur analytique au seuil 5% pour les différents ions étudiés.

Ca ⁺⁺ (A.A.)	Ca ⁺⁺ (C.I.)	Ca ⁺⁺ (A.A.)	Ca ⁺⁺ (C.I.)	Mg ⁺⁺ (A.A.)	Mg ⁺⁺ (C.I.)	Mg ⁺⁺ (A.A.)	Mg ⁺⁺ (C.I.)
4,3	4,0	28,0	23,0	4,6	5,0	12,9	11,7
7,0	5,0	33,0	38,0	8,0	8,5	17,3	18,0
14,8	12,5	21,0	20,2	9,6	10,2	13,7	14,0
22,8	22,0	23,0	25,0	11,9	13,0	12,8	13,4
35,5	40,5	23,0	17,5	22,6	23,5	13,4	13,7
28,0	32,0	7,8	6,0	18,9	17,0	14,2	9,3
66,8	70,0	21,5	20,5	23,1	22,0	12,5	13,5
31,0	34,4	10,5	6,5	16,7	17,0	8,9	10,3
34,5	34,0	6,5	3,5	16,1	16,3	9,1	9,3
22,3	23,0	6,5	4,5	11,2	11,8	6,2	6,3
47,5	57,0	28,0	30,5	27,9	30,0	16,5	16,5
53,0	54,0	26,8	26,5	19,0	20,0	13,5	13,7
45,5	47,5	15,5	12,0	20,0	21,5	10,7	11,4
34,3	34,0	19,8	14,8	16,2	19,4	13,7	13,0
22,0	22,5	12,3	10,0	12,7	13,5	14,4	14,0
27,0	30,0	3,0	1,7	13,8	14,7	5,5	5,4

Tableau A.1.6 : Intercalibration entre la chromatographie ionique (C.I.) et l'absorption atomique (A.A.) pour Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ sur des échantillons de glace antarctique (les concentrations sont exprimées en ng.g⁻¹).

temps (heure)	0,00	0,08	0,30	0,55	1,00	1,50	2,07	5,70	8,62
NH_4^+ (ng.g ⁻¹)	<0,5	1	2	3	8	10	16	31	49

Tableau A.1.7 : Evolution de la concentration en NH_4^+ , dans un récipient laissé à l'air libre dans une hotte sans poussière, en fonction du temps.

Série a	2,0	2,0	1,0	1,5	1,0	3,25	2,5	2,5	1,75	1,50
Série b	8,0	6,0	8,25	3,0	3,0	12,75	5,0	7,7	5,75	6,50

Tableau A.1.8 : Comparaison de la teneur en NH_4^+ (ng.g⁻¹) dans deux séries d'échantillons prélevées côte à côte à la station Pôle Sud. La série a est correcte, la série b a subi une fusion accidentelle.

Profondeur (m)	244,0	296,0	404	448	503	601	699
1e mesure	2,0	2,0	2,5	3,2	3,2	2,0	2,0
2e mesure	6,0	8,0	6,5	6,5	12,0	7,5	9,0
3e mesure	11,0	18,0	-	-	18,0	-	13,0

Tableau A.1.9 : Concentrations en NH_4^+ (ng.g⁻¹) obtenues lors de mesures successives effectuées sur des échantillons de glace provenant de la station Vostok.

Fraction n°	% Vf	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	NO ₂ ⁻
1	0 - 9	750	50	809	- 13,30	500	90,0	400	15
2	18 - 27	43	30	52	+ 2,80	70	65,0	170	6
3	36 - 45	18	30	7	+ 3,80	41	45,0	125	6
4	54 - 63	14	28	1	+ 3,90	36	42,0	120	6
5	72 - 81	14	29	1	+ 4,15	37	42,5	130	6
6	91 - 100	14	0,75	1	+ 3,95	36,5	35,0	120	0

Tableau A.1.10 : Résultats de la décontamination par "fusion-lavage" effectuée sur une section de carotte du forage 905 au Dôme C; les concentrations sont exprimées en ng.g⁻¹.

A N N E X E N° 2 : LISTE DES TABLEAUX DE CALCULS ET DE RESULTATS

- A.2.1. : Teneurs en ions majeurs (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--}) observées (en ng. g^{-1}) dans la neige déposée au Pôle Sud entre 2 et 4 mètres de profondeur
- A.2.2. : Calculs du déséquilibre cations-anions (ΔC), de la charge ionique totale (Σ), de l'excès de chlore et de sulfate, ainsi que l'acidité calculée, à partir des concentrations en $\mu\text{Eq. l}^{-1}$ des différents ions contenus dans la neige du Pôle Sud (2 à 4 mètres de profondeur)
- A.2.3. : Teneurs en ions majeurs observées (en ng. g^{-1}) dans la neige déposée au Pôle Sud entre 5 et 6 mètres de profondeur
- A.2.4. : Calculs du déséquilibre cations-anions (ΔC), de la charge ionique totale (Σ), de l'excès de chlore et de sulfate, ainsi que l'acidité calculée à partir des concentrations en $\mu\text{Eq. l}^{-1}$ des différents ions contenus dans la neige du Pôle Sud (5 à 6 mètres de profondeur)
- A.2.5. : Exemple de redistribution en dix parties égales d'une couche annuelle (Pôle Sud, année 1950) couverte par sept échantillons
- A.2.6. : Exemple de redistribution en dix parties égales d'une couche annuelle (Pôle Sud, année 1962) couverte par douze échantillons
- A.2.7. : Signaux saisonniers moyens obtenus au Pôle Sud pour la période 1959-69
- A.2.8. : Signaux saisonniers moyens obtenus au Pôle Sud pour la période 1949-53
- A.2.9. : Mesure de la conductivité liquide (C) à 25° C, sur une carotte de vingt cinq mètres au Pôle Sud
- A.2.10. : Teneurs en ions majeurs (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--}) observées (en ng. g^{-1}) dans la neige déposée à la balise D 55 (Terre Adélie), entre 2,25 et 3,71 m de profondeur

- A.2.11. : Calculs des excès de sulfate et de chlore (respectivement de sodium) ainsi que l'acidité calculée à partir des concentrations (en $\mu \text{Eq. l}^{-1}$) des différents ions contenus dans la neige de D 55
- A.2.12. : Teneurs en ions majeurs (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--}) observées (en ng. g^{-1}) dans la neige déposée à la balise D 80 entre 3,64 et 14,54 mètres de profondeur
- A.2.13. : Calculs du déséquilibre cations-anions (ΔC), de la charge ionique totale (Σ), de l'excès de chlore et de sulfate, ainsi que l'acidité calculée, à partir des concentrations (en $\mu \text{Eq. l}^{-1}$) des différents ions contenus dans la neige de D 80 (3,64 à 14,54 mètres de profondeur)
- A.2.14. : Teneurs en ions majeurs (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--}) observées dans la neige déposée à Dôme C entre 0,77 et 2,80 mètres de profondeur
- A.2.15. : Calculs du déséquilibre cations-anions (ΔC), de la charge ionique totale (Σ), de l'excès de chlore et de sulfate, ainsi que l'acidité calculée, à partir des concentrations (en $\mu \text{Eq. l}^{-1}$) des différents ions contenus dans la neige du Dôme C (0,77 à 2,80 mètres de profondeur)
- A.2.16. : Contribution relative des trois acides minéraux HCl , HNO_3 et H_2SO_4 à l'acidité totale (calculée) pour la précipitation déposée à la balise D 55 (période 1959-1969)
- A.2.18. : Contribution relative des trois acides minéraux HCl , HNO_3 et H_2SO_4 à l'acidité totale (calculée) pour la précipitation déposée au Pôle Sud (période 1959-1969)
- A.2.19. : Contribution relative des trois acides minéraux HCl , HNO_3 et H_2SO_4 à l'acidité totale (calculée) pour la précipitation déposée à Dôme C (période 1959-1969)
- A.2.20. : Teneurs en ions majeurs (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--}) observées (en ng. g^{-1}) sur des carottes du Dôme C (2,00 à 9,57 mètres de profondeur) recarottées à l'aide du dispositif décrit en figure N° 11 (chapitre 1)
- A.2.21. : Calculs du déséquilibre cations-anions (ΔC), de la charge ionique globale (Σ), de l'excès de chlore et de sulfate, ainsi que l'acidité à partir des concentrations (en $\mu \text{Eq. l}^{-1}$) des différents ions contenus dans la neige du Dôme C (2,00 à 9,57 mètres de profondeur)

- A.2.22. : Teneurs en ions majeurs (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--}) observées (en ng. g^{-1}) sur des carottes du Dôme C (2,50 à 10,15 mètres de profondeur) recarottées à la scie téflonnée
- A.2.23. : Calculs du déséquilibre cations-anions (ΔC), de la charge ionique globale (Σ), de l'excès de chlore et de sulfate, ainsi que l'acidité à partir des concentrations (en $\mu \text{Eq. l}^{-1}$) des différents ions contenus dans la neige du Dôme C (2,50 à 10,15 mètres de profondeur)
- A.2.24. : Teneurs en ions majeurs (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--}) observées (en ng. g^{-1}) sur des carottes du Dôme C (9,88 à 15,66 mètres de profondeur) recarottées à l'aide du dispositif décrit en figure 11 (chapitre 1)
- A.2.25. : Calculs du déséquilibre cations-anions (ΔC), de charge ionique globale (Σ), de l'excès de chlore et de sulfate, ainsi que l'acidité à partir des concentrations des différents ions contenus dans la neige du Dôme C (9,88 à 15,66 mètres de profondeur)
- A.2.26. : Teneurs en ions majeurs (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--}) observées (en ng. g^{-1}) dans la neige de surface prélevée sur les 430 premiers kilomètres de l'axe Dumont d'Urville-Dôme C, le rapport Cl/Na et les excès de chlore sont calculés en ng. g^{-1}
- A.2.27. : Calculs du déséquilibre cations-anions (ΔC), de la charge ionique globale (Σ), de l'excès de chlore et de sulfate ainsi que l'acidité, à partir des concentrations (en $\mu \text{Eq. l}^{-1}$) des différents ions contenus dans la neige de surface (entre 0 et 430 km de la côte en Terre Adélie)
- A.2.28. : Calcul de l'excès de sulfate entre 0,60 et 15,66 mètres de profondeur au Dôme C
- A.2.29. : Teneurs en ions majeurs (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--}) et en aluminium (en ng. g^{-1}) sur la carotte de 950 m de Vostok
- A.2.30. : Calculs du déséquilibre cations-anions (ΔC , ΔC_1 , ΔC_2 , voir texte), de la charge ionique globale (Σ), à partir des concentrations (en $\mu \text{Eq. l}^{-1}$) sur la carotte 950 m de Vostok

- A.2.31. : Teneurs en ions majeurs (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--}) observées (en ng. g^{-1}) sur la carotte 2150 m de Byrd, le rapport Cl/Na est calculé en ng. g^{-1}
- A.2.32. : Calcul du déséquilibre cations-anions (ΔC , ΔC_1 , ΔC_2 ; voir texte), de la charge ionique totale (Σ), à partir des concentrations (en $\mu \text{Eq. l}^{-1}$) obtenues sur la carotte de Byrd ; pour le calcul de Na^+ , ΔC_1 et ΔC_2 (voir texte) nous avons pris les teneurs en aluminium moyennes, publiées par Cragin et al. 1977 lorsque cela était nécessaire
- A.2.33. : Calculs de l'excès de sulfate sur la carotte de Byrd pour les trois cas de figure envisageables (voir texte)
- A.2.34. : Teneurs en ions majeurs (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--}) observées (en ng. g^{-1}) sur la carotte 300 m de D 10, le rapport Cl/Na est exprimé en ng. g^{-1}
- A.2.35. : Calculs du déséquilibre cations-anions (ΔC , ΔC_1 , ΔC_2 , voir texte), de la charge ionique totale (Σ), à partir des concentrations (en $\mu \text{Eq. l}^{-1}$) obtenues sur la carotte de D 10 ; pour le calcul de Na^+ , ΔC_1 et ΔC_2 (voir texte) nous avons pris les teneurs en aluminium moyennes, publiées par De Angelis et Legrand (en préparation)
- A.2.36. : Calculs de l'excès de sulfate sur la carotte de D 10 pour les trois cas de figure envisageables (voir texte)
- A.2.37. : Teneurs en ions majeurs (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{--}) et en aluminium observées (en ng. g^{-1}) sur la carotte 905 m du Dôme C
- A.2.38. : Calculs du déséquilibre cations-anions (ΔC , ΔC_1 et ΔC_2 , voir texte) de la charge ionique totale (Σ) à partir des concentrations (en $\mu \text{Eq. l}^{-1}$) sur la carotte du Dôme C
- A.2.39. : Calculs de l'excès de sulfate sur la carotte de Dôme C pour les trois cas de figures envisageables (voir texte)

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl/ Na	Cl ⁻ ex.	Année présumée
2,00 - 2,02	14,5	4,0	2,3	4,0	45,3	126	66	3,1	22,8	b10
2,02 - 2,04	24,2	7,5	1,6	2,5	56,3	96	52	2,3	16,3	b9
2,04 - 2,06	23,0	5,0	1,0	2,6	56,3	89	54	2,4	18,5	b8
2,06 - 2,08	22,1	7,0	0,8	2,1	45,0	89	56	2,0	8,8	b7
2,08 - 2,10	28,0	5,7	1,4	2,4	54,5	88	56	1,9	7,7	b6
2,10 - 2,12	9,7	2,8	1,1	3,0	28,3	88	51	2,9	14,4	b5
2,12 - 2,14	8,9	8,0	0,1	3,3	29,5	100	53	3,3	15,3	b4
2,14 - 2,16	7,9	2,0	1,0	3,1	27,4	96	57	3,5	16,8	b3
2,16 - 2,18	7,5	2,0	0,9	4,1	27,5	122	76	3,7	17,6	b2
2,18 - 2,20	6,0	4,4	0,8	3,6	28,9	129	62	4,8	21,7	b1
2,20 - 2,22	7,5	2,0	0,9	3,7	30,0	110	100	4,0	20,1	b6
2,22 - 2,24	12,1	3,5	1,1	3,1	32,8	108	92	2,7	14,6	b5
2,24 - 2,26	5,9	2,6	0,8	4,1	24,4	96	96	4,1	17,4	b4
2,26 - 2,28	7,6	4,0	1,0	3,5	28,1	86	92	3,7	18,1	b3
2,28 - 2,30	6,0	3,0	1,2	3,7	24,4	97	84	4,1	17,2	b2
2,30 - 2,32	6,3	1,8	1,3	4,3	28,3	107	80	4,5	20,6	b1
2,32 - 2,34	17,5	4,0	1,5	5,3	45,6	93	116	2,6	17,7	b12
2,34 - 2,36	29,2	3,2	1,1	3,6	64,3	84	82	2,2	15,3	b11
2,36 - 2,38	31,5	3,2	1,2	3,8	52,2	63	74	1,7	0,0	b10
2,38 - 2,40	24,1	2,6	2,2	2,2	49,6	71	53	2,1	9,8	b9
2,40 - 2,42	22,1	5,0	1,4	2,3	43,6	75	54	2,0	7,4	b8
2,42 - 2,44	20,4	5,7	0,7	2,3	45,0	70	57	2,2	11,9	b7
2,44 - 2,46	19,2	4,0	0,2	3,0	35,3	73	55	1,8	4,3	b6
2,46 - 2,48	11,0	4,5	0,7	2,9	28,1	83	53	2,5	11,9	b5
2,48 - 2,50	13,9	5,5	0,7	3,7	34,8	86	48	2,5	13,4	b4
2,50 - 2,52	12,7	5,0	0,6	3,5	34,8	88	56	2,7	15,5	b3
2,52 - 2,54	11,7	2,3	0,8	4,7	34,1	110	68	2,9	16,6	b2
2,54 - 2,56	11,7	5,7	1,0	4,6	45,8	105	70	4,3	30,1	b1

Tableau A.2.1

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/ Na	Cl ⁻ ex.	Année présumée
2,56 - 2,58	19,5	4,6	0,7	4,0	60,0	100	96	3,1	28,5	b9
2,58 - 2,60	22,3	2,1	1,2	3,6	59,0	88	64	2,6	22,5	b8
2,60 - 2,62	21,8	4,2	1,5	4,4	62,3	88	64	2,9	26,7	b7
2,62 - 2,64	23,5	1,7	0,2	3,4	66,0	86	63	2,8	27,3	b6
2,64 - 2,66	27,4	4,5	1,7	3,5	66,8	96	62	2,4	21,1	b5
2,66 - 2,68	38,6	2,0	1,1	2,3	81,0	106	66	2,1	15,1	b4
2,68 - 2,70	20,2	3,8	0,8	3,0	50,0	110	58	2,5	17,2	b3
2,70 - 2,72	12,3	1,1	0,3	4,8	41,5	103	98	3,4	23,0	b2
2,72 - 2,74	13,3	2,8	1,0	4,7	69,4	92	114	5,2	49,1	b1
2,74 - 2,76	16,2	6,1	0,7	3,7	92,6	80	82	5,7	67,0	b9
2,76 - 2,78	22,0	4,8	0,6	3,4	79,7	77	88	3,6	43,7	b8
2,78 - 2,80	20,5	8,0	0,3	3,0	61,5	75	80	3,0	28,2	b7
2,80 - 2,82	18,5	0,8	0,8	3,1	45,0	78	105	2,4	15,3	b6
2,82 - 2,84	17,6	1,7	1,1	4,0	35,1	68	94	2,0	7,0	b5
2,84 - 2,86	13,2	2,7	0,2	3,8	37,3	77	96	2,8	17,1	b4
2,86 - 2,88	15,0	2,1	2,2	4,2	38,2	82	110	2,6	14,8	b3
2,88 - 2,90	9,0	1,6	0,9	4,8	45,3	87	128	5,0	32,7	b2
2,90 - 2,92	13,6	1,3	0,7	5,9	40,1	87	175	3,0	19,2	b1
2,92 - 2,94	21,5	1,3	1,0	5,8	38,5	82	172	1,8	3,4	b11
2,94 - 2,96	18,9	1,7	0,4	5,7	43,5	76	166	2,3	13,1	b10
2,96 - 2,98	20,2	3,0	1,3	5,1	36,9	76	163	1,8	4,1	b9
2,98 - 3,00	19,6	4,1	1,2	4,9	38,9	72	180	2,0	7,2	b8
3,00 - 3,02	16,5	2,0	1,0	4,9	42,7	73	134	2,6	16,6	b7
3,02 - 3,04	16,6	5,0	1,5	4,0	37,5	76	132	2,3	11,2	b6
3,04 - 3,06	17,3	3,2	2,6	5,1	37,5	84	152	2,2	10,0	b5
3,06 - 3,08	12,9	8,0	1,2	5,0	45,6	89	140	3,5	26,0	b4
3,08 - 3,10	13,3	1,8	1,5	5,1	30,4	90	144	2,3	10,1	b3
3,10 - 3,12	13,3	1,9	0,7	5,2	40,2	96	136	3,0	19,9	b2
3,12 - 3,14	15,0	1,0	1,0	2,9	45,0	88	80	3,0	21,6	b1

Tableau A.2.1

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl/ Na	Cl ⁻ ex.	Année présumée
3,14 - 3,16	13,0	5,0	1,3	2,7	45,6	86	56	3,5	25,8	b10
3,16 - 3,18	15,0	3,0	1,5	2,4	46,0	88	52	3,1	22,6	b9
3,18 - 3,20	16,2	3,0	2,0	3,0	47,6	89	50	2,9	22,0	b8
3,20 - 3,22	18,2	2,8	1,8	3,3	48,0	90	50	2,6	18,8	b7
3,22 - 3,24	15,8	2,0	0,6	2,7	45,6	106	46	2,9	20,8	b6
3,24 - 3,26	18,3	3,2	0,8	3,4	46,9	110	46	2,6	17,6	b5
3,26 - 3,28	15,8	1,4	1,4	2,8	56,3	108	44	3,6	31,5	b4
3,28 - 3,30	15,8	0,2	1,0	3,1	42,9	122	49	2,7	18,1	b3
3,30 - 3,32	17,1	2,0	1,6	2,9	44,9	118	58	2,6	17,6	b2
3,32 - 3,34	17,0	4,5	2,0	3,3	64,3	88	87	3,8	37,3	b1
3,34 - 3,36	18,3	2,0	1,0	2,3	46,3	80	38	2,5	17,0	b12
3,36 - 3,38	16,1	0,8	0,4	2,4	42,7	77	38	2,6	17,3	b11
3,38 - 3,40	20,1	1,8	2,0	2,2	44,2	82	40	2,2	11,6	b10
3,40 - 3,42	22,4	1,8	2,2	2,1	49,6	80	42	2,2	12,9	b9
3,42 - 3,44	17,6	0,1	1,0	2,5	35,7	80	41	2,0	7,6	b8
3,44 - 3,46	9,9	4,1	0,3	2,8	30,8	63	34	3,1	16,6	b7
3,46 - 3,48	11,2	1,5	0,6	2,5	30,5	80	40	2,7	13,9	b6
3,48 - 3,50	11,6	1,5	2,0	2,4	34,2	84	36	2,9	16,9	b5
3,50 - 3,52	8,5	1,8	0,8	2,6	24,8	90	38	2,9	13,1	b4
3,52 - 3,54	9,1	2,5	0,4	2,1	29,7	84	34	3,3	16,9	b3
3,54 - 3,56	8,0	1,0	1,7	2,7	33,5	91	48	4,2	22,7	b2
3,56 - 3,58	11,9	1,7	1,4	3,2	40,0	100	56	3,4	22,2	b1

Tableau A.2.1

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/ Na	Cl ⁻ ex.	Année présumée
3,58 - 3,60	11,0	1,1	0,5	3,0	39,2	90	44	3,6	23,0	b8
3,60 - 3,62	11,5	0,1	1,2	2,5	38,6	97	38	3,4	21,5	b7
3,62 - 3,64	13,2	1,9	0,7	2,6	32,8	88	38	2,5	12,6	b6
3,64 - 3,66	14,3	0,1	1,8	2,8	34,2	85	41	2,4	12,1	b5
3,66 - 3,68	13,7	3,0	0,2	1,9	31,1	83	36	2,3	10,0	b4
3,68 - 3,70	13,6	2,7	0,7	2,3	31,6	97	38	2,3	10,7	b3
3,70 - 3,72	12,1	0,8	0,5	2,8	35,4	104	34	2,9	17,2	b2
3,72 - 3,74	14,2	2,0	2,0	4,7	47,2	93	70	3,3	25,2	b1
3,74 - 3,76	27,7	1,7	1,7	3,0	75,3	92	58	2,7	29,0	b6
3,76 - 3,78	26,3	0,1	1,4	2,9	55,9	78	43	2,1	12,2	b5
3,78 - 3,80	23,6	2,4	1,1	2,3	58,8	84	45	2,5	19,9	b4
3,80 - 3,82	23,0	2,2	1,3	2,5	52,3	89	44	2,3	14,5	b3
3,82 - 3,84	20,0	1,2	0,5	2,6	51,2	86	38	2,6	18,8	b2
3,84 - 3,86	14,8	3,2	0,5	3,0	46,1	89	49	3,1	23,1	b1
3,86 - 3,88	23,9	5,0	0,3	3,2	56,3	70	114	2,4	16,9	
3,88 - 3,90	19,8	1,2	1,6	3,1	52,3	79	64	2,6	20,3	
3,90 - 3,92	18,8	1,1	1,0	2,5	53,8	82	54	2,9	23,6	
3,92 - 3,94	20,0	5,2	0,8	2,4	52,5	75	51	2,6	20,1	
3,94 - 3,96	19,8	2,5	0,6	2,8	51,2	83	52	2,6	19,2	
3,96 - 3,98	17,8	1,2	0,5	2,7	36,7	89	50	2,1	8,3	
3,98 - 4,00	17,0	5,0	0,5	2,7	45,5	77	49	2,7	18,5	

Tableau A.2.1

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Σ	Cl ⁻ _{ex.}	SO ₄ ^{--★} _{ex.}	H ⁺ _{calculée}
2,00 - 2,02	0,54	0,12	0,22	0,06	4,03	1,28	2,04	1,38	+0,3	9,7	0,64	1,30	3,98
2,02 - 2,04	0,96	0,22	0,42	0,04	2,50	1,59	1,64	1,09	-0,1	8,4	0,46	0,95	2,95
2,04 - 2,06	0,91	0,21	0,28	0,02	2,65	1,59	1,43	1,13	-0,1	8,3	0,52	1,01	2,96
2,06 - 2,08	0,87	0,20	0,39	0,02	2,07	1,27	1,43	1,17	-0,3	7,4	0,25	1,05	2,74
2,08 - 2,10	1,13	0,26	0,32	0,03	2,44	1,54	1,41	1,17	+0,1	8,3	0,21	1,02	2,64
2,10 - 2,12	0,33	0,08	0,16	0,03	3,02	0,80	1,42	1,06	+0,3	6,9	0,42	1,01	2,85
2,12 - 2,14	0,30	0,07	0,44	0,00	3,33	0,83	1,61	1,10	+0,6	7,7	0,47	1,05	3,14
2,14 - 2,16	0,26	0,06	0,11	0,02	3,09	0,77	1,54	1,19	0,0	7,0	0,47	1,15	3,16
2,16 - 2,18	0,24	0,05	0,11	0,02	4,09	0,77	1,97	1,58	+0,2	8,8	0,50	1,54	4,01
2,18 - 2,20	P,17	0,04	0,24	0,02	3,59	0,81	2,08	1,29	-0,1	8,2	0,60	1,26	3,95
2,20 - 2,22	0,24	0,06	0,11	0,02	3,72	0,85	1,77	2,08	-0,6	8,8	0,57	2,04	4,38
2,22 - 2,24	0,44	0,10	0,19	0,03	3,14	0,92	1,75	1,92	-0,7	8,5	0,40	1,86	4,01
2,24 - 2,26	0,17	0,04	0,14	0,02	4,12	0,69	1,55	2,00	+0,2	8,7	0,49	1,97	4,01
2,26 - 2,28	0,24	0,06	0,22	0,02	3,45	0,79	1,38	1,92	-0,1	8,1	0,50	1,88	3,76
2,28 - 2,30	0,17	0,04	0,17	0,03	3,75	0,69	1,57	1,75	+0,1	8,2	0,48	1,72	3,77
2,30 - 2,32	0,19	0,04	0,10	0,03	4,31	0,80	1,72	1,67	+0,5	8,9	0,57	1,64	3,94
2,32 - 2,34	0,67	0,16	0,22	0,04	5,27	1,29	1,50	2,42	+1,2	11,6	0,49	2,33	4,32
2,34 - 2,36	1,18	0,27	0,18	0,03	3,63	1,81	1,36	1,71	+0,4	10,2	0,42	1,56	3,34
2,36 - 2,38	1,29	0,30	0,18	0,03	3,78	1,47	1,02	1,54	+1,5	9,6	0,00	1,37	2,39
2,38 - 2,40	0,96	0,22	0,14	0,06	2,22	1,40	1,15	1,10	0,0	7,3	0,27	0,97	2,39
2,40 - 2,42	0,87	0,20	0,28	0,04	2,34	1,23	1,22	1,13	+0,2	7,3	0,21	1,01	2,44
2,42 - 2,44	0,80	0,18	0,32	0,02	2,35	1,27	1,13	1,19	+0,1	7,3	0,33	1,08	2,53
2,44 - 2,46	0,75	0,17	0,22	0,00	3,03	0,99	1,18	1,15	+0,8	7,5	0,12	1,05	2,35
2,46 - 2,48	0,39	0,09	0,25	0,02	2,95	0,79	1,34	1,10	+0,5	6,9	0,33	1,04	2,71
2,48 - 2,50	0,52	0,12	0,30	0,02	3,72	0,98	1,38	1,00	+1,3	8,0	0,38	0,93	2,69

Tableau A.2.2

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Σ	Cl ⁻ _{ex.}	SO ₄ ^{--★} _{ex.}	H ⁺ _{calculée}
2,50 - 2,52	0,47	0,11	0,28	0,02	3,51	0,98	1,42	1,17	+0,8	8,0	0,44	1,10	2,96
2,52 - 2,54	0,42	0,10	0,13	0,02	4,74	0,96	1,78	1,42	+1,3	9,6	0,46	1,36	3,60
2,54 - 2,56	0,38	0,09	0,32	0,02	4,58	1,29	1,69	1,46	+1,0	9,8	0,84	1,40	3,93
2,56 - 2,58	0,76	0,17	0,25	0,02	4,03	1,69	1,60	2,00	0,0	10,5	0,80	1,90	4,30
2,58 - 2,60	0,88	0,20	0,12	0,03	3,60	1,66	1,43	1,33	+0,4	9,3	0,62	1,21	3,27
2,60 - 2,62	0,86	0,20	0,23	0,04	4,36	1,75	1,43	1,33	+1,2	10,2	0,74	1,22	3,39
2,62 - 2,64	0,94	0,22	0,09	0,00	3,37	1,86	1,39	1,31	+0,1	9,2	0,77	1,19	3,35
2,64 - 2,66	1,10	0,25	0,25	0,04	3,47	1,88	1,54	1,29	+0,4	9,9	0,59	1,15	3,28
2,66 - 2,68	1,59	0,37	0,11	0,02	2,34	2,28	1,72	1,38	-0,9	9,8	0,41	1,18	3,31
2,68 - 2,70	0,79	0,18	0,21	0,02	3,12	1,41	1,78	1,21	-0,2	8,6	0,48	1,10	3,35
2,70 - 2,72	0,45	0,10	0,06	0,01	4,76	1,17	1,65	2,04	+0,5	10,2	0,65	1,98	4,28
2,72 - 2,74	0,49	0,11	0,16	0,02	4,69	1,96	1,48	2,38	-0,3	11,3	1,37	2,31	5,16
2,74 - 2,76	0,62	0,14	0,34	0,02	3,68	2,61	1,29	1,71	-0,8	10,4	1,90	1,63	4,81
2,76 - 2,78	0,87	0,20	0,27	0,02	3,43	2,25	1,24	1,83	-0,5	10,1	1,23	1,71	4,18
2,78 - 2,80	0,80	0,18	0,44	0,01	3,05	1,73	1,21	1,67	-0,1	9,1	0,80	1,56	3,57
2,80 - 2,82	0,72	0,17	0,04	0,02	3,10	1,27	1,26	2,20	-0,7	8,8	0,43	2,09	3,78
2,82 - 2,84	0,68	0,16	0,09	0,03	3,95	0,99	1,10	1,96	+0,8	9,0	0,19	1,87	3,16
2,84 - 2,86	0,49	0,11	0,15	0,00	3,75	1,05	1,24	2,00	+0,2	8,8	0,47	1,93	3,64
2,86 - 2,88	0,56	0,13	0,12	0,06	4,21	1,08	1,32	2,29	+0,4	9,8	0,42	2,31	3,96
2,88 - 2,90	0,30	0,07	0,09	0,02	4,79	1,28	1,40	2,67	-0,1	10,6	0,92	2,62	4,94
2,90 - 2,92	0,50	0,12	0,07	0,02	5,90	1,13	1,41	3,65	+0,4	12,8	0,54	3,58	5,53
2,92 - 2,94	0,85	0,20	0,07	0,02	5,76	1,09	1,32	3,58	+0,9	12,9	0,12	3,47	4,91
2,94 - 2,96	0,73	0,17	0,09	0,01	5,65	1,23	1,22	3,45	+0,8	12,6	0,36	3,36	4,95
2,96 - 2,98	0,79	0,18	0,17	0,03	5,05	1,04	1,23	3,40	+0,6	11,9	0,11	3,29	4,63
2,98 - 3,00	0,77	0,18	0,23	0,03	4,89	1,10	1,16	3,75	+0,1	12,1	0,20	3,65	5,01

Tableau A.2.2

Profondeur(m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Σ	Cl ⁻ _{ex.}	SO ₄ ^{--★} _{ex.}	calculée ^{H+}
3,00 - 3,02	0,63	0,15	0,11	0,02	4,94	1,20	1,17	2,80	+0,7	11,0	0,46	2,70	4,33
3,02 - 3,04	0,63	0,15	0,28	0,04	3,96	1,06	1,23	2,75	0,0	10,1	0,32	2,66	4,21
3,04 - 3,06	0,66	0,15	0,18	0,06	5,08	1,06	1,36	3,17	+0,6	11,7	0,28	3,08	4,72
3,06 - 3,08	0,47	0,11	0,44	0,03	5,02	1,29	1,43	2,92	+0,4	11,7	0,72	2,85	5,01
3,08 - 3,10	0,49	0,11	0,10	0,04	5,08	0,86	1,46	3,00	+0,5	11,1	0,28	2,93	4,67
3,10 - 3,12	0,49	0,11	0,11	0,02	5,24	1,13	1,54	2,83	+0,5	11,5	0,55	2,76	4,85
3,12 - 3,14	0,56	0,13	0,06	0,02	2,92	1,27	1,41	1,67	-0,7	8,1	0,62	1,59	3,62
3,14 - 3,16	0,48	0,11	0,28	0,03	2,65	1,29	1,39	1,17	-0,3	7,4	0,71	1,10	3,20
3,16 - 3,18	0,56	0,13	0,17	0,04	2,43	1,30	1,42	1,08	-0,4	7,1	0,64	1,00	3,06
3,18 - 3,20	0,62	0,14	0,17	0,05	2,98	1,34	1,44	1,04	+0,1	7,8	0,62	0,96	3,02
3,20 - 3,22	0,70	0,16	0,16	0,04	3,30	1,35	1,46	1,04	+0,5	8,2	0,53	0,94	2,93
3,22 - 3,24	0,60	0,14	0,11	0,01	2,74	1,29	1,72	0,96	-0,4	7,6	0,57	0,88	3,17
3,24 - 3,26	0,71	0,16	0,18	0,02	3,39	1,32	1,78	0,96	+0,4	8,5	0,48	0,86	3,12
3,26 - 3,28	0,60	0,14	0,08	0,03	2,83	1,59	1,75	0,92	-0,6	8,0	0,88	0,83	3,46
3,28 - 3,30	0,60	0,14	0,01	0,02	3,08	1,21	1,97	1,02	-0,3	8,1	0,50	0,94	3,41
3,30 - 3,32	0,66	0,15	0,11	0,04	2,90	1,27	1,91	1,21	-0,5	8,3	0,50	1,12	3,52
3,32 - 3,34	0,66	0,15	0,25	0,05	3,26	1,81	1,42	1,81	-0,7	9,4	1,04	1,72	4,18
3,34 - 3,36	0,71	0,16	0,11	0,02	2,30	1,30	1,29	0,79	-0,1	6,7	0,46	0,69	2,44
3,36 - 3,38	0,61	0,14	0,04	0,01	2,42	1,20	1,24	0,79	0,0	6,5	0,48	0,71	2,43
3,38 - 3,40	0,79	0,18	0,10	0,05	2,24	1,25	1,32	0,83	0,0	6,8	0,33	0,72	2,38
3,40 - 3,42	0,89	0,20	0,10	0,06	2,13	1,40	1,29	0,88	-0,2	7,0	0,36	0,76	2,42
3,42 - 3,44	0,68	0,16	0,00	0,02	2,50	1,00	1,29	0,85	+0,2	6,5	0,21	0,76	2,26
3,44 - 3,46	0,34	0,08	0,23	0,01	2,83	0,87	1,02	0,71	+0,9	6,1	0,47	0,66	2,15
3,46 - 3,48	0,40	0,09	0,08	0,01	2,52	0,86	1,29	0,83	+0,1	6,1	0,39	0,77	2,45
3,48 - 3,50	0,42	0,10	0,08	0,05	2,38	0,96	1,36	0,74	0,0	6,1	0,48	0,68	2,52

Tableau A.2.2

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	ΔC	Σ	Cl ⁻ _{ex.}	SO ₄ ^{--★} _{ex.}	H ⁺ _{calculé}
3,50 - 3,52	0,28	0,07	0,10	0,02	2,56	0,70	1,45	0,79	+0,1	6,0	0,37	0,75	2,57
3,52 - 3,54	0,31	0,07	0,14	0,01	2,07	0,84	1,36	0,71	-0,3	5,5	0,48	0,66	2,50
3,54 - 3,56	0,26	0,06	0,06	0,04	2,72	0,94	1,47	1,00	-0,3	6,6	0,63	0,96	3,06
3,56 - 3,58	0,43	0,10	0,10	0,03	3,21	1,13	1,61	1,17	0,0	7,8	0,62	1,11	3,34
3,58 - 3,60	0,39	0,09	0,06	0,01	2,96	1,10	1,45	0,92	+0,1	7,0	0,64	0,86	2,95
3,60 - 3,62	0,41	0,10	0,00	0,03	2,50	1,09	1,57	0,79	-0,4	6,5	0,61	0,73	2,91
3,62 - 3,64	0,49	0,11	0,11	0,02	2,56	0,92	1,42	0,79	+0,2	6,4	0,35	0,72	2,49
3,64 - 3,66	0,53	0,12	0,00	0,05	2,84	0,96	1,38	0,86	+0,4	6,8	0,34	0,78	2,50
3,66 - 3,68	0,51	0,12	0,17	0,00	1,90	0,88	1,34	0,75	-0,3	5,7	0,29	0,68	2,31
3,68 - 3,70	0,50	0,11	0,15	0,02	2,32	0,89	1,56	0,79	-0,1	6,4	0,30	0,72	2,58
3,70 - 3,72	0,44	0,10	0,04	0,01	2,85	1,00	1,67	0,71	+0,1	6,8	0,48	0,65	2,80
3,72 - 3,74	0,53	0,12	0,11	0,05	4,67	1,33	1,50	1,46	+1,2	9,8	0,70	1,38	3,59
3,74 - 3,76	1,12	0,26	0,10	0,04	2,99	2,12	1,48	1,21	-0,3	9,3	0,82	1,06	3,36
3,76 - 3,78	1,06	0,24	0,00	0,03	2,90	1,57	1,26	0,90	+0,5	8,0	0,34	0,76	2,36
3,78 - 3,80	0,94	0,22	0,13	0,03	2,32	1,66	1,36	0,94	-0,3	7,6	0,57	0,82	2,75
3,80 - 3,82	0,91	0,21	0,12	0,03	2,55	1,47	1,44	0,92	0,0	7,7	0,40	0,80	2,64
3,82 - 3,84	0,78	0,18	0,07	0,01	2,58	1,44	1,38	0,79	0,0	7,3	0,52	0,68	2,58
3,84 - 3,86	0,56	0,13	0,18	0,01	2,99	1,30	1,44	1,02	+0,1	7,6	0,65	0,94	3,03
3,86 - 3,88	0,95	0,22	0,28	0,01	3,25	1,59	1,12	2,38	-0,4	9,8	0,47	2,25	3,84
3,88 - 3,90	0,77	0,18	0,07	0,04	3,08	1,47	1,27	1,33	+0,1	8,2	0,56	1,23	3,06
3,90 - 3,92	0,73	0,17	0,06	0,02	2,53	1,52	1,32	1,13	-0,4	7,5	0,66	1,03	3,01
3,92 - 3,94	0,78	0,18	0,29	0,02	2,42	1,48	1,22	1,06	0,0	7,5	0,56	0,95	2,73
3,94 - 3,96	0,77	0,18	0,14	0,01	2,75	1,44	1,34	1,08	0,0	7,7	0,53	0,98	2,85
3,96 - 3,98	0,69	0,16	0,07	0,01	2,72	1,03	1,44	1,04	+0,2	7,2	0,23	0,95	2,62
3,98 - 4,00	0,65	0,15	0,28	0,01	2,72	1,28	1,25	1,02	+0,3	7,4	0,51	0,93	2,69

Tableau A.2.2.

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl/ Na	Cl ⁻ ex.	Année présumée
5,00 - 5,02	21,9	1,7	1,4	3,7	56,4	98	61	2,6	20,6	1 9 5 2
5,02 - 5,04	24,4	1,7	1,5	3,3	58,0	100	56	2,4	17,7	
5,04 - 5,06	15,4	1,6	0,9	3,6	48,2	99	54	3,1	24,1	
5,06 - 5,08	24,0	2,5	0,7	3,8	42,5	101	88	1,8	3,0	
5,08 - 5,10	12,1	2,0	2,2	3,5	44,1	94	43	3,6	25,9	
5,10 - 5,12	8,2	1,2	2,0	4,0	42,5	110	43	5,2	31,3	
5,12 - 5,14	25,6	1,6	1,1	3,4	58,0	101	56	2,3	15,5	b10
5,14 - 5,16	35,4	1,8	1,8	3,9	70,3	85	75	2,0	10,2	b9
5,16 - 5,18	29,2	1,3	1,1	3,8	73,0	79	65	2,2	24,0	b8
5,18 - 5,20	32,6	0,8	1,4	3,0	63,8	79	52	2,0	8,7	b7
5,20 - 5,22	30,6	2,5	1,1	2,5	55,6	81	50	1,8	4,1	b6
5,22 - 5,24	26,4	2,5	1,2	2,7	49,9	81	50	1,9	6,0	b5
5,24 - 5,26	23,2	2,3	1,1	2,9	46,4	77	44	2,0	8,1	b4
5,26 - 5,28	20,6	4,3	1,5	3,1	43,3	97	50	2,1	9,8	b3
5,28 - 5,30	5,7	2,0	0,7	3,5	35,5	100	38	6,2	28,8	b2
5,30 - 5,32	9,3	1,5	0,2	3,6	42,7	104	34	4,6	29,6	b1
5,32 - 5,34	7,3	2,5	0,7	3,5	48,6	101	35	6,7	39,1	b10
5,34 - 5,36	5,1	2,0	0,1	3,6	38,9	97	36	7,6	33,3	b9
5,36 - 5,38	25,2	1,5	2,7	3,0	55,7	95	53	2,2	13,9	b8
5,38 - 5,40	23,6	2,5	0,7	2,9	49,9	97	48	2,1	10,9	b7
5,40 - 5,42	25,4	2,0	1,4	3,3	56,9	90	58	2,2	14,8	b6
5,42 - 5,44	18,0	2,0	1,2	3,3	60,9	97	52	3,4	32,1	b5
5,44 - 5,46	9,0	1,0	1,6	3,4	33,0	81	64	3,7	20,4	b4
5,46 - 5,48	11,2	1,5	0,4	3,9	36,3	115	66	3,2	19,7	b3
5,48 - 5,50	4,9	1,0	2,5	4,3	42,1	105	62	8,6	38,9	b2

Tableau A.2.3

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Cl ⁻ _{ex.}	Année présumée
5,50 - 5,52	9,7	3,2	1,9	4,3	35,0	126	76	3,6	21,1	b1
5,52 - 5,54	29,7	2,5	1,6	3,7	58,3	117	66	2,0	8,4	b9
5,54 - 5,56	30,6	2,5	1,8	3,8	66,1	104	56	2,2	14,6	b8
5,56 - 5,58	32,3	1,8	1,9	3,3	63,5	102	58	2,0	9,0	b7
5,58 - 5,60	29,6	1,7	1,9	2,9	57,6	93	51	2,0	7,9	b6
5,60 - 5,62	22,7	5,3	0,5	3,0	45,8	103	47	2,0	8,5	b5
5,62 - 5,64	23,2	5,3	1,0	2,9	47,4	104	45	2,0	9,2	b4
5,64 - 5,66	12,0	5,0	0,3	3,6	31,1	116	61	2,6	13,1	b3
5,66 - 5,68	6,0	2,6	0,3	4,1	26,2	100	62	4,4	19,0	b2
5,68 - 5,70	19,7	5,3	0,7	3,8	39,2	104	80	2,0	7,3	b1
5,70 - 5,72	23,4	2,2	0,3	3,1	50,7	99	50	2,2	12,2	b7
5,72 - 5,74	24,8	3,2	0,3	2,3	41,7	79	42	1,7	0,7	b6
5,74 - 5,76	27,8	4,8	1,9	2,5	56,4	89	46	2,0	10,0	b5
5,76 - 5,78	23,1	1,6	2,3	2,9	44,1	97	48	1,9	6,1	b4
5,78 - 5,80	11,5	2,9	0,3	2,9	31,7	101	53	2,8	14,6	b3
5,80 - 5,82	9,9	3,5	0,4	3,0	29,4	106	43	3,0	15,2	b2
5,82 - 5,84	7,7	5,0	0,0	3,9	29,4	123	51	3,8	19,1	b1
5,84 - 5,86	5,4	2,0	2,2	4,2	38,4	120	53	7,1	32,3	b8
5,86 - 5,88	11,4	2,8	0,9	3,8	43,3	104	44	3,8	26,4	b7
5,88 - 5,90	21,2	2,8	0,7	3,2	49,0	97	51	2,3	14,4	b6
5,90 - 5,92	27,7	3,3	1,2	3,1	49,4	103	50	1,8	3,1	b5
5,92 - 5,94	22,3	4,0	0,6	2,8	45,8	87	42	2,1	9,3	b4
5,94 - 5,96	9,0	5,3	0,9	3,7	27,0	99	61	3,0	14,4	b3
5,96 - 5,98	6,4	3,3	0,4	3,6	20,4	103	59	3,2	12,5	b2
5,98 - 6,00	6,0	2,4	0,5	3,7	26,2	107	50	4,4	19,0	b1

Tableau A.2.3

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁼⁼	ΔC	Σ	Cl ⁻ _{ex.}	SO ₄ ⁼⁼ ★ _{ex.}	H ⁺ calculée
5,00 - 5,02	0,87	0,20	0,09	0,03	3,70	1,59	1,58	1,27	+0,4	9,3	0,57	1,16	3,31
5,02 - 5,04	0,97	0,22	0,09	0,04	3,30	1,63	1,61	1,17	+0,2	9,0	0,50	1,05	3,16
5,04 - 5,06	0,58	0,13	0,09	0,02	3,60	1,36	1,60	1,11	+0,3	8,5	0,68	1,04	3,32
5,06 - 5,08	0,95	0,22	0,14	0,02	3,80	1,20	1,63	1,84	+0,5	9,8	0,09	1,73	3,45
5,08 - 5,10	0,44	0,10	0,11	0,06	3,50	1,24	1,51	0,89	+0,6	7,8	0,73	0,84	3,08
5,10 - 5,12	0,27	0,06	0,06	0,05	4,04	1,20	1,77	0,89	+0,6	8,3	0,88	0,86	3,51
5,12 - 5,14	1,03	0,24	0,09	0,03	3,39	1,63	1,63	1,17	+0,3	9,2	0,42	1,05	3,10
5,14 - 5,16	1,45	0,33	0,10	0,04	3,87	1,98	1,37	1,56	+0,9	10,7	0,28	1,38	3,03
5,16 - 5,18	1,18	0,27	0,07	0,03	3,84	2,06	1,28	1,35	+0,7	10,1	0,68	1,21	3,17
5,18 - 5,20	1,33	0,31	0,04	0,03	3,00	1,80	1,28	1,08	+0,6	8,9	0,24	0,92	2,44
5,20 - 5,22	1,24	0,29	0,14	0,03	2,50	1,57	1,31	1,04	+0,3	8,1	0,12	0,89	2,32
5,22 - 5,24	1,06	0,24	0,14	0,03	2,72	1,41	1,31	1,04	+0,4	8,0	0,17	0,91	2,39
5,24 - 5,26	0,92	0,21	0,13	0,03	2,87	1,31	1,25	0,92	+0,7	7,6	0,23	0,81	2,29
5,26 - 5,28	0,81	0,19	0,24	0,04	3,13	1,22	1,56	1,04	+0,6	8,2	0,27	0,94	2,77
5,28 - 5,30	0,16	0,04	0,11	0,02	3,53	1,00	1,61	0,79	+0,5	7,3	0,81	0,77	3,20
5,30 - 5,32	0,32	0,07	0,08	0,01	3,60	1,20	1,68	0,71	+0,5	7,7	0,83	0,67	3,18
5,32 - 5,34	0,23	0,05	0,14	0,02	3,50	1,37	1,63	0,73	+0,2	7,7	1,17	0,70	3,50
5,34 - 5,36	0,13	0,03	0,11	0,00	3,57	1,09	1,57	0,75	+0,4	7,3	0,94	0,73	3,24
5,36 - 5,38	1,01	0,23	0,08	0,07	3,00	1,57	1,54	1,09	+0,2	8,6	0,39	0,97	2,90
5,38 - 5,40	0,94	0,22	0,14	0,02	2,90	1,40	1,57	1,00	+0,2	8,2	0,30	0,89	2,76
5,40 - 5,42	1,02	0,23	0,11	0,04	3,30	1,60	1,45	1,21	+0,4	9,0	0,41	1,09	3,21
5,42 - 5,44	0,70	0,16	0,11	0,03	3,30	1,71	1,57	1,08	-0,1	8,7	0,89	1,00	3,46
5,44 - 5,46	0,30	0,07	0,06	0,04	3,40	0,93	1,31	1,33	+0,3	7,4	0,58	1,29	3,18
5,46 - 5,48	0,40	0,09	0,08	0,01	3,90	1,02	1,85	1,38	+0,2	8,7	0,55	1,33	3,73
5,48 - 5,50	0,13	0,03	0,06	0,06	4,28	1,19	1,69	1,29	+0,4	8,7	1,04	1,27	4,00

Tableau A.2.4

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Σ	Cl ⁻ _{ex.}	SO ₄ ^{--★} _{ex.}	H ⁺ calculée
5,50 - 5,52	0,34	0,08	0,18	0,05	4,30	0,99	2,04	1,58	+0,3	9,6	0,59	1,54	4,17
5,52 - 5,54	1,20	0,28	0,14	0,04	3,70	1,64	1,89	1,38	+0,4	10,3	0,24	1,23	3,36
5,54 - 5,56	1,24	0,29	0,14	0,04	3,80	1,86	1,68	1,17	+0,8	10,2	0,41	1,02	3,11
5,56 - 5,58	1,32	0,30	0,10	0,05	3,30	1,78	1,65	1,21	+0,4	9,7	0,24	1,05	2,94
5,58 - 5,60	1,20	0,28	0,09	0,05	2,90	1,62	1,50	1,06	+0,3	8,7	0,22	0,90	2,62
5,60 - 5,62	0,90	0,21	0,29	0,01	3,00	1,29	1,65	0,98	+0,5	8,3	0,24	0,87	2,76
5,62 - 5,64	0,92	0,21	0,29	0,03	2,90	1,34	1,68	0,94	+0,4	8,3	0,26	0,83	2,77
5,64 - 5,66	0,43	0,10	0,28	0,01	3,60	0,88	1,87	1,28	+0,4	8,5	0,38	1,23	3,48
5,66 - 5,68	0,17	0,04	0,13	0,01	4,06	0,74	1,61	1,30	+0,8	8,1	0,54	1,28	3,43
5,68 - 5,70	0,77	0,18	0,29	0,02	3,80	1,10	1,68	1,67	+0,6	9,5	0,20	1,58	3,46
5,70 - 5,72	0,93	0,21	0,12	0,01	3,11	1,43	1,60	1,04	+0,3	8,4	0,34	0,93	2,87
5,72 - 5,74	0,99	0,23	0,18	0,01	2,30	1,17	1,28	0,88	+0,4	7,0	0,01	0,76	2,05
5,74 - 5,76	1,12	0,26	0,26	0,05	2,50	1,59	1,44	0,97	+0,2	8,2	0,28	0,83	2,55
5,76 - 5,78	0,92	0,21	0,09	0,06	2,93	1,24	1,56	1,00	+0,4	8,0	0,16	0,89	2,61
5,78 - 5,80	0,41	0,09	0,16	0,01	2,94	0,89	1,63	1,11	0,0	7,2	0,41	1,06	3,10
5,80 - 5,82	0,34	0,08	0,19	0,01	3,01	0,83	1,71	0,90	+0,2	7,1	0,43	0,86	3,00
5,82 - 5,84	0,25	0,06	0,28	0,00	3,87	0,83	1,98	1,06	+0,6	8,3	0,54	1,03	3,55
5,84 - 5,86	0,15	0,03	0,11	0,06	4,20	1,08	1,93	1,10	+0,4	8,7	0,90	1,08	3,91
5,86 - 5,88	0,41	0,09	0,15	0,02	3,84	1,22	1,68	0,92	+0,7	8,3	0,74	0,87	3,29
5,88 - 5,90	0,83	0,19	0,15	0,02	3,23	1,38	1,56	1,07	+0,4	8,4	0,41	0,97	2,94
5,90 - 5,92	1,12	0,26	0,18	0,03	3,11	1,39	1,66	1,04	+0,6	8,8	0,08	0,90	2,64
5,92 - 5,94	0,88	0,20	0,22	0,02	2,79	1,29	1,40	0,88	+0,5	7,7	0,26	0,77	2,43
5,94 - 5,96	0,30	0,07	0,29	0,02	3,66	0,76	1,60	1,27	+0,7	8,0	0,41	1,23	3,24
5,96 - 5,98	0,19	0,04	0,18	0,01	3,58	0,57	1,66	1,23	+0,5	7,5	0,35	1,21	3,22
5,98 - 6,00	0,17	0,04	0,13	0,01	3,73	0,74	1,73	1,04	+0,6	7,6	0,54	1,02	3,29

Tableau A.2.4

Découpage	$\delta D (‰)$	Na^+	Cl/Na	H^+	NO_3^-	SO_4^{--}	Cl^-	NH_4^+	K^+
b_1	- 381,7	7,7	3,8	3,9	123	51	29	5,0	0,0
$\frac{3 b_1 + 4 b_2}{7}$	- 383,6	9,0	3,3	3,4	113	46	29	4,1	0,3
$\frac{6 b_2 + b_3}{7}$	- 386,6	10,1	2,9	3,0	105	44	30	3,4	0,4
b_3	- 395,7	11,5	2,8	2,9	101	53	32	2,9	0,3
$\frac{2 b_3 + 5 b_4}{7}$	- 401,7	19,8	2,1	2,9	99	49	41	2,0	1,7
$\frac{5 b_4 + 2 b_5}{7}$	- 405,9	24,4	1,9	2,8	95	47	48	2,5	2,1
b_5	- 410,5	27,8	2,0	2,5	89	46	56	4,8	1,9
$\frac{b_5 + 6 b_6}{7}$	- 413,6	25,2	1,7	2,3	81	43	44	3,4	0,5
$\frac{4 b_6 + 3 b_7}{7}$	- 411,7	24,2	1,9	2,7	88	45	46	2,8	0,3
b_7	-408,6	23,4	2,2	3,1	99	50	51	2,2	0,3

Tableau A.2.5 : Exemple de redistribution en dix parties égales d'une couche annuelle (Pôle Sud, année 1950) couverte par sept échantillons. Les concentrations sont exprimées en $ng.g^{-1}$, le rapport Cl/Na calculé en poids.

Découpage	δD (‰)	Na^+	Cl/Na	H^+	NO_3^-	SO_4^{--}	Cl^-	NH_4^+	K^+
$\frac{10b_1 + 2b_2}{12}$	- 395,0	11,2	3,5	3,1	98	55	39	1,6	1,5
$\frac{8 b_2 + 4 b_3}{12}$	- 402,3	8,4	3,9	2,5	89	43	32	1,5	1,3
$\frac{6 b_3 + 6 b_4}{12}$	- 408,0	8,8	3,1	2,3	87	36	27	2,1	0,6
$\frac{4 b_4 + 8 b_5}{12}$	- 409,8	10,6	2,9	2,4	86	36	31	1,6	1,6
$\frac{2 b_5 + 10 b_6}{12}$	- 411,3	11,3	2,8	2,5	81	39	31	1,5	0,8
$\frac{10b_7 + 2 b_8}{12}$	- 413,6	11,2	2,9	2,8	66	35	32	3,4	0,4
$\frac{8 b_8 + 4 b_9}{12}$	- 417,4	19,2	2,1	2,4	80	41	40	0,6	1,4
$\frac{6 b_9 + 6 b_{10}}{12}$	- 419,3	21,2	2,2	2,2	81	41	47	1,8	2,1
$\frac{4b_{10} + 8b_{11}}{12}$	- 419,0	17,4	2,5	2,4	79	39	43	1,1	0,9
$\frac{2b_{11} + 10b_{12}}{12}$	- 416,4	17,9	2,6	2,3	79	38	46	1,8	0,9

Tableau A.2.6 : Exemple de redistribution en dix parties égales d'une couche annuelle (Pôle Sud, année 1962) couverte par douze échantillons. Les concentrations sont exprimées en $ng.g^{-1}$, le rapport Cl/Na calculé en poids.

δD (‰)	Na^+	Cl/Na	H^+	NO_3^-	SO_4^{--}	Cl^-	NH_4^+	K^+
1 - 400 \pm 10	12,2 \pm 3,6	3,8 \pm 0,8	4,0 \pm 0,9	98 \pm 13	85 \pm 36	45 \pm 13	2,8 \pm 1,5	1,2 \pm 0,5
2 - 404 \pm 8	11,6 \pm 3,6	3,5 \pm 0,7	3,9 \pm 0,9	101 \pm 12	78 \pm 35	35 \pm 8	1,9 \pm 0,6	0,9 \pm 0,4
3 - 410 \pm 7	13,0 \pm 4,4	2,9 \pm 0,5	3,4 \pm 0,8	96 \pm 12	68 \pm 36	36 \pm 9	2,4 \pm 1,4	1,0 \pm 0,5
4 - 414 \pm 8	15,1 \pm 7,3	2,9 \pm 0,6	3,2 \pm 0,8	92 \pm 10	66 \pm 34	41 \pm 15	3,6 \pm 2,2	1,0 \pm 0,5
5 - 416 \pm 9	16,6 \pm 7,1	2,5 \pm 0,5	3,1 \pm 0,7	86 \pm 11	66 \pm 34	40 \pm 14	3,0 \pm 0,9	1,0 \pm 0,5
6 - 418 \pm 9	18,0 \pm 6,7	2,6 \pm 0,6	3,1 \pm 0,8	84 \pm 13	66 \pm 31	44 \pm 13	3,0 \pm 1,7	1,0 \pm 0,4
7 - 418 \pm 9	18,9 \pm 5,0	2,5 \pm 0,5	3,1 \pm 0,9	84 \pm 9	70 \pm 38	45 \pm 11	3,0 \pm 1,7	1,1 \pm 0,4
8 - 414 \pm 10	20,2 \pm 5,0	2,5 \pm 0,5	3,2 \pm 0,8	84 \pm 12	70 \pm 38	49 \pm 11	3,2 \pm 2,0	1,4 \pm 0,5
9 - 409 \pm 9	19,7 \pm 6,7	2,8 \pm 0,6	3,3 \pm 0,9	88 \pm 11	73 \pm 38	53 \pm 15	2,8 \pm 2,1	1,1 \pm 0,4
10 - 401 \pm 11	16,8 \pm 5,7	3,3 \pm 1,1	3,7 \pm 1,1	94 \pm 15	82 \pm 40	52 \pm 19	3,1 \pm 1,8	1,1 \pm 0,5

Tableau A.2.7 : Signaux saisonniers moyens obtenus au Pôle Sud pour la période 1959-1969; les concentrations sont données en $ng.g^{-1}$ pour les différents ions, le rapport Cl/Na est évalué en poids.

	δD (‰)	Na^+	Cl/Na	H^+	NO_3^-	SO_4^{--}	Cl^-	NH_4^+	K^+
1	-387 ± 8	$10,5 \pm 5,4$	$3,7 \pm 1,9$	$3,9 \pm 0,3$	113 ± 11	58 ± 19	35 ± 7	$3,5 \pm 1,6$	$0,7 \pm 0,7$
2	-392 ± 9	$6,7 \pm 1,6$	$5,1 \pm 2,2$	$3,8 \pm 0,4$	104 ± 5	54 ± 11	31 ± 8	$2,6 \pm 1,2$	$0,8 \pm 0,9$
3	-401 ± 10	$12,1 \pm 4,9$	$2,9 \pm 0,5$	$3,5 \pm 0,4$	106 ± 8	56 ± 9	33 ± 7	$3,6 \pm 1,2$	$0,6 \pm 0,5$
4	-408 ± 9	$15,1 \pm 5,9$	$2,7 \pm 0,7$	$3,2 \pm 0,3$	93 ± 13	54 ± 7	37 ± 7	$3,3 \pm 1,8$	$0,9 \pm 0,5$
5	-415 ± 9	$21,9 \pm 3,2$	$2,3 \pm 0,6$	$2,9 \pm 0,2$	93 ± 9	48 ± 4	49 ± 8	$3,1 \pm 1,5$	$1,1 \pm 0,4$
6	-419 ± 9	$26,8 \pm 2,4$	$2,0 \pm 0,2$	$2,9 \pm 0,3$	92 ± 8	51 ± 4	52 ± 4	$2,8 \pm 0,7$	$1,4 \pm 0,5$
7	-418 ± 7	$27,5 \pm 4,2$	$2,0 \pm 0,1$	$2,9 \pm 0,3$	92 ± 8	50 ± 3	56 ± 6	$2,5 \pm 1,5$	$1,3 \pm 0,6$
8	-413 ± 5	$25,6 \pm 5,9$	$2,2 \pm 0,5$	$3,2 \pm 0,6$	92 ± 11	53 ± 9	57 ± 12	$2,2 \pm 0,9$	$1,4 \pm 0,9$
9	-404 ± 8	$21,0 \pm 13,0$	$3,7 \pm 2,5$	$3,6 \pm 0,5$	97 ± 10	52 ± 15	52 ± 14	$2,3 \pm 0,4$	$1,0 \pm 0,8$
10	-394 ± 9	$18,3 \pm 11,1$	$4,04 \pm 2,6$	$3,6 \pm 0,4$	108 ± 10	52 ± 11	51 ± 8	$2,1 \pm 0,4$	$1,2 \pm 0,8$

Tableau A.2.8 : Signaux saisonniers moyens obtenus au Pôle Sud pour la période 1949-1953; les concentrations sont données en $ng.g^{-1}$ pour les différents ions, le rapport Cl/Na est évalué en poids.

Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
0,00 - 0,10	2,4	1,52 - 1,58	2,7	2,90 - 2,95	1,9	4,21 - 4,26	2,3
0,10 - 0,20	2,8	1,58 - 1,64	2,1	2,95 - 3,00	1,9	4,26 - 4,31	2,9
0,20 - 0,29	2,4	1,64 - 1,70	2,3	3,00 - 3,05	2,1	4,31 - 4,37	2,2
0,29 - 0,35	2,5	1,70 - 1,76	2,3	3,05 - 3,10	2,1	4,37 - 4,42	2,1
0,35 - 0,41	2,1	1,76 - 1,82	2,3	3,10 - 3,15	2,1	4,42 - 4,47	2,1
0,41 - 0,47	2,4	1,82 - 1,88	2,4	3,15 - 3,20	3,6	4,47 - 4,52	2,1
0,47 - 0,55	2,2	1,88 - 1,94	2,4	3,20 - 3,25	2,6	4,52 - 4,58	2,4
0,55 - 0,61	2,1	1,94 - 2,00	2,6	3,25 - 3,30	2,3	4,58 - 4,64	2,1
0,61 - 0,66	2,2	2,00 - 2,06	2,1	3,30 - 3,35	2,5	4,64 - 4,70	2,3
0,66 - 0,72	2,1	2,06 - 2,11	2,1	3,35 - 3,40	2,8	4,70 - 4,75	2,7
0,72 - 0,77	2,0	2,11 - 2,17	2,5	3,40 - 3,46	2,2	4,75 - 4,80	2,7
0,77 - 0,83	2,0	2,17 - 2,21	2,1	3,46 - 3,51	2,3	4,80 - 4,85	2,4
0,83 - 0,88	2,6	2,21 - 2,28	2,2	3,51 - 3,57	2,5	4,85 - 4,90	2,5
0,88 - 0,94	2,6	2,28 - 2,33	2,2	3,57 - 3,63	2,2	4,90 - 4,95	2,4
0,94 - 1,00	2,8	2,33 - 2,39	2,0	3,63 - 3,68	2,3	4,95 - 5,00	2,3
1,00 - 1,07	-	2,39 - 2,44	2,2	3,68 - 3,74	3,3	5,00 - 5,05	2,1
1,07 - 1,14	2,3	2,44 - 2,50	2,1	3,74 - 3,81	2,2	5,05 - 5,10	2,5
1,14 - 1,20	2,3	2,50 - 2,55	2,3	3,81 - 3,88	2,5	5,10 - 5,15	2,2
1,20 - 1,27	2,5	2,55 - 2,60	2,4	3,88 - 3,94	3,0	5,15 - 5,20	2,2
1,27 - 1,33	-	2,60 - 2,66	2,2	3,94 - 4,00	3,7	5,20 - 5,25	2,1
1,33 - 1,38	2,2	2,66 - 2,72	2,0	4,00 - 4,05	2,9	5,25 - 5,30	2,3
1,38 - 1,43	2,2	2,72 - 2,78	2,0	4,05 - 4,10	3,1	5,30 - 5,35	2,3
1,43 - 1,47	2,2	2,78 - 2,84	2,1	4,10 - 4,16	2,7	5,35 - 5,40	3,2
1,47 - 1,52	2,4	2,84 - 2,90	2,1	4,16 - 4,21	2,2	5,40 - 5,45	2,9

Tableau A.2.9

Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
5,45 - 5,51	2,3	6,71 - 6,77	2,2	8,00 - 8,05	2,1	9,30 - 9,35	2,3
5,51 - 5,56	2,2	6,77 - 6,82	2,1	8,05 - 8,10	2,2	9,35 - 9,40	2,4
5,56 - 5,62	2,3	6,82 - 6,87	2,3	8,10 - 8,15	2,1	9,40 - 9,45	2,5
5,62 - 5,68	2,5	6,87 - 6,93	2,4	8,15 - 8,20	2,2	9,45 - 9,50	2,3
5,68 - 5,74	2,3	6,93 - 7,00	2,1	8,20 - 8,25	2,2	9,50 - 9,58	2,2
5,74 - 5,80	2,4	7,00 - 7,05	1,9	8,25 - 8,30	2,1	9,58 - 9,63	2,1
5,80 - 5,85	2,4	7,05 - 7,10	1,9	8,30 - 8,35	2,4	9,63 - 9,68	2,2
5,85 - 5,90	2,3	7,10 - 7,15	2,2	8,35 - 8,40	2,3	9,68 - 9,73	2,1
5,90 - 5,95	2,1	7,15 - 7,20	2,3	8,40 - 8,45	2,3	9,73 - 9,78	2,1
5,95 - 6,00	2,2	7,20 - 7,25	2,6	8,46 - 8,52	2,0	9,78 - 9,83	2,0
6,00 - 6,05	2,1	7,25 - 7,30	2,2	8,52 - 8,59	2,1	9,83 - 9,88	2,2
6,05 - 6,10	2,1	7,30 - 7,35	2,3	8,59 - 8,65	2,2	9,88 - 9,94	2,2
6,10 - 6,15	2,3	7,35 - 7,40	2,3	8,65 - 8,72	2,3	9,94 - 10,00	2,0
6,15 - 6,20	2,3	7,40 - 7,46	2,2	8,72 - 8,78	2,1	10,00-10,05	2,0
6,20 - 6,25	2,3	7,46 - 7,51	2,4	8,78 - 8,84	2,6	10,05-10,10	2,1
6,25 - 6,30	2,4	7,51 - 7,57	2,1	8,84 - 8,89	2,0	10,10-10,15	2,1
6,30 - 6,35	2,4	7,57 - 7,62	2,2	8,89 - 8,95	2,2	10,15-10,20	2,3
6,35 - 6,40	2,0	7,62 - 7,67	2,0	8,95 - 9,00	2,3	10,20-10,25	2,0
6,40 - 6,45	1,9	7,67 - 7,73	2,1	9,00 - 9,05	2,1	10,25-10,30	2,7
6,45 - 6,50	1,9	7,73 - 7,78	1,9	9,05 - 9,10	2,4	10,30-10,35	2,0
6,50 - 6,55	2,1	7,78 - 7,84	1,9	9,10 - 9,15	2,5	10,35-10,40	1,9
6,55 - 6,61	2,0	7,84 - 7,89	2,2	9,15 - 9,20	2,5	10,40-10,45	2,0
6,61 - 6,66	2,3	7,89 - 7,94	2,1	9,20 - 9,25	2,5	10,45-10,50	1,9
6,66 - 6,71	2,3	7,94 - 8,00	2,3	9,25 - 9,30	2,3	10,50-10,56	1,9

Tableau A.2.9

Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
10,56 - 10,61	2,2	11,85 - 11,90	2,2	13,11 - 13,16	2,5	14,39 - 14,44	1,9
10,61 - 10,66	2,1	11,90 - 11,95	2,3	13,16 - 13,21	2,3	14,44 - 14,49	1,9
10,66 - 10,72	2,1	11,95 - 12,00	2,1	13,21 - 13,26	2,2	14,49 - 14,54	1,8
10,72 - 10,78	2,1	12,00 - 12,05	2,8	13,26 - 13,31	1,9	14,54 - 14,60	2,2
10,78 - 10,83	2,1	12,05 - 12,10	2,1	13,31 - 13,37	1,9	14,60 - 14,65	2,1
10,83 - 10,89	1,9	12,10 - 12,16	2,0	13,37 - 13,42	1,8	14,65 - 14,71	2,6
10,89 - 10,95	2,0	12,16 - 12,21	1,9	13,42 - 13,47	1,9	14,71 - 14,76	2,3
10,95 - 11,00	1,9	12,21 - 12,26	2,0	13,47 - 13,52	1,8	14,76 - 14,82	2,1
11,00 - 11,05	1,9	12,26 - 12,31	2,2	13,52 - 13,57	1,9	14,82 - 14,87	2,0
11,05 - 11,10	2,1	12,31 - 12,36	2,1	13,57 - 13,63	1,9	14,87 - 14,93	2,3
11,10 - 11,15	2,0	12,36 - 12,42	2,2	13,63 - 13,68	2,0	14,93 - 15,00	2,3
11,15 - 11,20	2,0	12,42 - 12,47	2,3	13,68 - 13,73	2,1	15,00 - 15,08	2,2
11,20 - 11,26	2,3	12,47 - 12,52	2,3	13,73 - 13,79	2,1	15,08 - 15,14	2,0
11,26 - 11,31	2,3	12,52 - 12,57	2,5	13,79 - 13,85	2,1	15,14 - 15,20	1,9
11,31 - 11,36	2,2	12,57 - 12,62	2,5	13,85 - 13,91	2,1	15,20 - 15,25	2,0
11,36 - 11,41	2,2	12,62 - 12,68	2,3	13,91 - 13,96	1,9	15,25 - 15,30	2,4
11,41 - 11,46	2,2	12,68 - 12,72	2,3	13,96 - 14,02	2,0	15,30 - 15,35	2,3
11,46 - 11,52	2,2	12,72 - 12,78	2,5	14,02 - 14,07	1,9	15,35 - 15,40	2,3
11,52 - 11,57	2,7	12,78 - 12,83	2,1	14,07 - 14,13	1,9	15,40 - 15,45	2,4
11,57 - 11,63	2,4	12,83 - 12,88	2,2	14,13 - 14,19	1,9	15,45 - 15,50	2,4
11,63 - 11,68	2,3	12,88 - 12,93	2,4	14,19 - 14,24	1,8	15,50 - 15,55	2,4
11,68 - 11,74	2,2	12,93 - 13,00	2,4	14,24 - 14,29	1,8	15,55 - 15,62	2,2
11,74 - 11,79	2,1	13,00 - 13,05	2,3	14,29 - 14,34	1,9	15,62 - 15,68	2,7
11,79 - 11,85	2,2	13,05 - 13,11	2,5	14,34 - 14,39	2,0	15,68 - 15,73	2,4

Tableau A.2.9

Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
15,73 - 15,78	2,0	16,99 - 17,04	2,1	18,26 - 18,31	2,2	19,55 - 19,60	1,7
15,78 - 15,83	2,3	17,04 - 17,09	2,0	18,31 - 18,37	2,2	19,60 - 19,65	1,7
15,83 - 15,88	2,0	17,09 - 17,15	2,3	18,37 - 18,42	2,0	19,65 - 19,70	1,8
15,88 - 15,93	2,0	17,15 - 17,20	2,1	18,42 - 18,48	2,0	19,70 - 19,75	1,9
15,93 - 15,98	2,1	17,20 - 17,25	2,0	18,48 - 18,53	1,9	19,75 - 19,80	2,0
15,98 - 16,03	2,0	17,25 - 17,30	2,0	18,53 - 18,59	1,8	19,80 - 19,85	2,1
16,03 - 16,08	2,0	17,30 - 17,35	1,9	18,59 - 18,64	1,9	19,85 - 19,90	2,0
16,08 - 16,14	2,1	17,35 - 17,40	1,6	18,64 - 18,70	1,8	19,90 - 19,95	1,9
16,14 - 16,20	2,0	17,40 - 17,45	1,9	18,70 - 18,75	1,9	19,95 - 20,00	1,9
16,20 - 16,25	1,9	17,45 - 17,50	1,8	18,75 - 18,81	1,8	20,00 - 20,05	1,8
16,25 - 16,30	1,8	17,50 - 17,55	1,9	18,81 - 18,86	1,9	20,05 - 20,10	1,8
16,30 - 16,36	2,0	17,55 - 17,60	1,8	18,86 - 18,92	1,9	20,10 - 20,15	1,9
16,36 - 16,41	1,9	17,60 - 17,65	1,8	18,92 - 18,97	1,9	20,15 - 20,20	1,8
16,41 - 16,46	1,9	17,65 - 17,70	1,7	18,97 - 19,03	1,9	20,20 - 20,25	1,8
16,46 - 16,51	1,8	17,70 - 17,75	1,7	19,03 - 19,09	1,9	20,25 - 20,30	1,8
16,51 - 16,56	1,8	17,75 - 17,80	1,8	19,09 - 19,14	1,9	20,30 - 20,35	1,8
16,56 - 16,61	2,0	17,81 - 17,87	1,9	19,14 - 19,20	1,9	20,35 - 20,40	1,8
16,61 - 16,67	1,9	17,87 - 17,92	1,8	19,20 - 19,25	1,9	20,40 - 20,45	1,8
16,67 - 16,72	1,7	17,92 - 17,98	2,0	19,25 - 19,30	1,8	20,45 - 20,50	1,8
16,72 - 16,77	1,8	17,98 - 18,03	1,9	19,30 - 19,35	1,7	20,50 - 20,55	1,8
16,77 - 16,83	1,9	18,03 - 18,09	2,1	19,35 - 19,40	1,7	20,55 - 20,60	1,8
16,83 - 16,88	2,2	18,09 - 18,14	2,0	19,40 - 19,45	1,8	20,60 - 20,65	1,9
16,88 - 16,93	2,3	18,14 - 18,20	2,1	19,45 - 19,50	1,8	20,65 - 20,70	1,8
16,93 - 16,99	2,0	18,20 - 18,26	2,2	19,50 - 19,55	1,7	20,70 - 20,75	1,8

Tableau A.2.9

Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Profondeur (m)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
20,75 - 20,80	1,9	21,95 - 22,00	1,8	23,00 - 23,05	6,4	24,00 - 24,05	1,9
20,80 - 20,86	1,9	22,00 - 22,05	1,9	23,05 - 23,10	6,0	24,05 - 24,10	1,9
20,86 - 20,92	2,0	22,05 - 22,10	1,9	23,10 - 23,15	2,9	24,10 - 24,15	1,9
20,92 - 20,98	2,1	22,10 - 22,15	2,0	23,15 - 23,20	2,3	24,15 - 24,20	1,8
20,98 - 21,04	2,3	22,15 - 22,21	1,9	23,20 - 23,25	2,3	24,20 - 24,26	2,0
21,04 - 21,10	2,4	22,21 - 22,27	1,9	23,25 - 23,30	2,0	24,26 - 24,31	1,8
21,15 - 21,21	2,1	22,27 - 22,33	2,0	23,30 - 23,35	2,0	24,31 - 24,36	2,2
21,21 - 21,26	2,0	22,33 - 22,39	2,0	23,35 - 23,40	2,0	24,36 - 24,42	2,0
21,26 - 21,32	1,9	22,39 - 22,45	2,1	23,40 - 23,45	2,1	24,42 - 24,47	2,1
21,32 - 21,38	1,8	22,45 - 22,50	1,9	23,45 - 23,50	1,8	24,47 - 24,54	2,2
21,38 - 21,44	1,7	22,50 - 22,55	1,8	23,50 - 23,55	2,0	24,54 - 24,60	2,2
21,44 - 21,50	1,9	22,55 - 22,60	1,9	23,55 - 23,60	2,3	24,60 - 24,65	2,1
21,50 - 21,55	1,9	22,60 - 22,65	1,9	23,60 - 23,65	2,4	24,66 - 24,72	2,1
21,55 - 21,61	2,1	22,65 - 22,70	1,9	23,65 - 23,70	2,5	24,72 - 24,78	2,0
21,61 - 21,67	2,0	22,70 - 22,75	2,0	23,70 - 23,75	3,1	24,78 - 24,84	1,9
21,67 - 21,73	2,0	22,75 - 22,80	2,1	23,75 - 23,80	2,4	24,84 - 24,90	1,9
21,73 - 21,79	1,9	22,80 - 22,85	2,2	23,80 - 23,85	2,0	24,90 - 24,96	2,0
21,79 - 21,85	1,9	22,85 - 22,90	4,7	23,85 - 23,90	1,9	24,96 - 25,01	2,1
21,85 - 21,90	1,9	22,90 - 22,95	6,1	23,90 - 23,95	2,1	25,01 - 25,06	2,0
21,90 - 21,95	1,9	22,95 - 23,00	6,0	23,95 - 24,00	2,0	25,06 - 25,12	2,0

Tableau A.2.9

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}
225 - 227	10,4	1,9	0,3	29,5	46	78	2,8	10,5	-
227 - 229	12,7	2,3	0,6	26,7	51	69	2,1	3,9	-
229 - 231	10,2	1,5	0,7	22,1	54	72	2,2	3,8	-
231 - 233	10,3	1,7	0,3	23,9	62	74	2,3	5,4	-
233 - 235	9,8	1,8	1,0	23,0	67	73	2,3	5,4	-
235 - 237	11,3	1,5	0,4	24,4	66	72	2,2	4,1	-
237 - 239	14,2	2,2	0,5	29,9	65	76	2,1	4,3	-
239 - 241	14,9	1,8	0,5	31,3	69	76	2,1	4,5	-
241 - 243	14,1	2,5	0,4	31,3	67	70	2,2	5,9	-
243 - 245	7,7	2,4	0,4	17,9	59	49	2,3	4,0	-
245 - 247	5,7	1,7	0,2	11,7	56	42	2,0	1,4	-
247 - 249	5,2	1,5	0,2	11,0	50	40	2,1	1,8	-
250 - 252	7,1	2,0	0,4	15,5	49	40	2,2	2,8	-
252 - 254	3,6	1,6	0,2	10,1	48	29	2,8	3,7	-
254 - 256	3,6	1,7	0,2	10,2	46	30	2,9	3,8	-
256 - 258	16,7	2,0	0,8	33,1	36	56	2,0	3,1	-
258 - 260	32,1	3,2	1,8	50,1	22	70	1,6	-	4,2
260 - 262	29,4	3,2	2,1	48,7	25	68	1,7	-	2,3
262 - 264	30,0	3,0	1,4	47,5	25	56	1,6	-	3,6
264 - 266	27,3	2,2	0,7	45,8	24	45	1,7	-	1,8
266 - 268	27,3	3,2	0,7	45,0	23	40	1,6	-	2,3
268 - 270	27,8	2,8	1,4	45,0	22	34	1,6	-	2,8
270 - 272	20,4	3,1	0,5	34,8	24	27	1,7	-	1,0
272 - 273	17,5	2,5	0,9	30,6	25	25	1,8	-	0,5

Tableau A.2.10

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}
273 - 275	14,3	5,2	0,5	25,3	27	24	1,8	-	0,2
275 - 277	12,4	4,6	0,7	21,0	28	22	1,7	-	0,7
276 - 278	11,8	3,4	0,5	21,0	31	26	1,8	-	0,1
278 - 280	14,8	3,5	1,1	23,5	28	24	1,6	-	1,7
280 - 282	34,0	5,1	1,0	47,0	25	65	1,4	-	7,9
282 - 284	15,0	4,4	0,5	25,9	22	31	1,7	-	0,6
284 - 286	13,0	3,4	0,5	22,1	23	24	1,7	-	0,7
286 - 288	11,6	3,2	0,6	20,2	22	27	1,7	-	0,4
288 - 290	19,6	4,3	0,7	28,4	20	51	1,5	-	3,8
290 - 292	12,5	4,5	0,5	20,6	28	53	1,7	-	1,0
292 - 294	11,4	4,2	0,8	19,5	27	38	1,7	-	0,6
294 - 296	10,0	5,2	0,6	15,7	26	33	1,6	-	1,3
296 - 298	9,2	3,9	0,7	18,6	29	35	2,0	2,1	-
298 - 300	9,6	3,1	0,3	16,9	40	49	1,8	-	0,2
300 - 302	14,2	4,0	0,5	22,3	41	85	1,6	-	1,8
302 - 304	12,0	3,1	0,5	22,8	41	107	1,9	1,2	-
304 - 306	9,8	2,4	0,3	20,6	44	109	2,1	2,9	-
306 - 308	24,0	4,3	1,6	34,1	38	105	1,4	-	5,0
308 - 310	27,5	3,0	2,3	33,9	30	96	1,2	-	8,7
310 - 312	7,4	4,3	0,2	12,7	29	47	1,7	-	0,3
312 - 314	3,5	3,3	0,4	8,1	28	36	2,3	1,8	-
314 - 316	3,6	3,5	0,2	13,1	24	33	3,6	6,6	-
316 - 318	3,6	4,7	0,1	6,9	25	28	1,9	0,4	-
318 - 320	3,4	4,1	0,2	6,3	25	28	1,9	0,2	-

Tableau A.2.10

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/ Na	Cl ⁻ ex.	Na ⁺ ex.
320 - 322	5,4	2,2	0,4	9,7	25	28	1,8	0,0	0,0
322 - 324	4,6	2,1	0,5	8,0	25	27	1,7	-	0,2
324 - 326	3,8	1,8	0,2	7,0	26	27	1,8	0,2	-
326 - 328	4,4	2,8	0,4	7,7	31	35	1,8	-	0,1
328 - 330	5,0	5,0	0,4	11,8	36	53	2,3	2,7	-
330 - 332	3,2	2,3	0,2	8,0	37	61	2,5	2,2	-
332 - 334	3,4	2,8	0,4	7,9	46	64	2,3	1,8	-
334 - 336	2,5	0,6	0,1	6,6	46	65	2,6	2,1	-
336 - 338	1,7	2,9	0,1	5,9	45	63	3,5	2,8	-
338 - 340	2,8	3,5	0,2	7,7	45	74	2,8	2,7	-
340 - 342	3,8	3,7	0,1	7,5	38	76	2,0	0,7	-
342 - 344	3,3	2,7	0,1	7,3	28	50	2,2	1,3	-
345 - 347	3,4	2,6	0,2	6,8	26	36	2,0	0,7	-
347 - 349	2,5	1,7	0,1	9,2	30	39	3,7	4,7	-
349 - 350	13,3	2,0	0,5	24,4	25	50	1,8	0,5	-
350 - 352	42,8	2,1	1,7	71,8	16	73	1,7	-	2,9
352 - 354	42,5	2,5	1,7	91,0	20	91	2,1	14,5	-
354 - 356	48,2	1,7	1,5	87,4	17	79	1,8	0,7	-
356 - 358	45,6	3,0	1,2	78,2	20	75	1,7	-	2,1
358 - 360	43,9	3,1	1,7	73,6	19	77	1,7	-	3,0
360 - 362	11,6	2,7	0,5	24,8	27	57	2,2	4,0	-
362 - 364	4,5	2,2	0,1	12,0	29	41	2,7	3,9	-
364 - 367	6,3	1,8	0,2	13,7	28	40	2,2	2,3	-
367 - 369	4,2	4,1	0,1	10,7	24	37	2,5	3,1	-
369 - 371	4,4	3,2	0,1	11,1	26	35	2,5	3,1	-

Tableau A.2.10

Profondeur (cm)	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}	SO ₄ ²⁻ ★ _{ex.}	NO ₃ ⁻ + Cl ⁻ _{ex.} + SO ₄ ²⁻ ★ _{ex.}
225 - 227	0,45	0,84	0,74	1,63	0,30	-	1,58	2,62
227 - 229	0,55	0,75	0,81	1,44	0,11	-	1,37	2,29
229 - 231	0,44	0,62	0,87	1,50	0,11	-	1,45	2,43
231 - 233	0,45	0,67	0,99	1,53	0,15	-	1,48	2,62
233 - 235	0,43	0,65	1,08	1,52	0,15	-	1,47	2,70
235 - 237	0,49	0,69	1,06	1,49	0,12	-	1,43	2,61
237 - 239	0,62	0,84	1,05	1,58	0,12	-	1,50	2,67
239 - 241	0,65	0,88	1,11	1,58	0,13	-	1,50	2,74
241 - 243	0,61	0,88	1,08	1,46	0,17	-	1,39	2,64
243 - 245	0,34	0,51	0,95	1,02	0,11	-	0,98	2,04
245 - 247	0,25	0,33	0,90	0,87	0,04	-	0,84	1,78
247 - 249	0,22	0,31	0,81	0,83	0,05	-	0,80	1,65
250 - 252	0,21	0,44	0,80	0,83	0,08	-	0,79	1,67
252 - 254	0,15	0,29	0,77	0,60	0,10	-	0,58	1,45
254 - 256	0,15	0,29	0,73	0,63	0,11	-	0,61	1,45
256 - 258	0,72	0,93	0,59	1,17	0,09	-	1,08	1,76
258 - 260	1,40	1,41	0,35	1,46	-	0,18	1,06	1,41
260 - 262	1,28	1,37	0,40	1,41	-	0,10	1,13	1,53
262 - 264	1,30	1,34	0,41	1,16	-	0,15	0,82	1,23
264 - 266	1,19	1,29	0,39	0,93	-	0,08	0,68	1,07
266 - 268	1,19	1,27	0,37	0,82	-	0,10	0,55	0,92
268 - 270	1,21	1,27	0,36	0,71	-	0,12	0,42	0,78
270 - 272	0,89	0,98	0,39	0,56	-	0,05	0,39	0,78
272 - 273	0,76	0,86	0,40	0,52	-	0,02	0,40	0,80

Tableau A.2.11

Profondeur (cm)	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	Na _{ex} ⁺	SO _{4 ex.} ^{--★}	NO ₃ ⁻ + SO _{4 ex.} ^{--★} + Cl _{ex.} ⁻
273 - 275	0,62	0,71	0,44	0,50	-	0,01	0,41	0,85
275 - 276	0,54	0,59	0,45	0,45	-	0,03	0,34	0,79
276 - 278	0,51	0,59	0,49	0,53	-	0,01	0,46	0,95
278 - 280	0,64	0,66	0,45	0,50	-	0,08	0,33	0,78
280 - 282	1,48	1,32	0,41	1,35	-	0,34	0,76	1,17
282 - 284	0,65	0,73	0,35	0,64	-	0,03	0,53	0,88
284 - 286	0,57	0,62	0,37	0,50	-	0,03	0,38	0,75
286 - 288	0,50	0,57	0,36	0,56	-	0,02	0,49	0,85
288 - 290	0,85	0,80	0,32	1,07	-	0,16	0,77	1,09
290 - 292	0,54	0,58	0,45	1,10	-	0,04	0,98	1,43
292 - 294	0,50	0,55	0,43	0,79	-	0,02	0,70	1,13
294 - 296	0,43	0,44	0,41	0,68	-	0,06	0,57	0,98
296 - 298	0,40	0,52	0,47	0,74	0,06	-	0,69	1,22
298 - 300	0,42	0,48	0,65	1,03	-	0,01	0,97	1,62
300 - 302	0,62	0,63	0,66	1,76	-	0,08	1,59	2,25
302 - 304	0,52	0,64	0,66	2,24	0,03	-	2,18	2,87
304 - 306	0,43	0,58	0,71	2,27	0,08	-	2,22	3,01
306 - 308	1,04	0,96	0,61	2,18	-	0,22	1,80	1,41
308 - 310	1,20	0,95	0,48	2,00	-	0,38	1,40	1,88
310 - 312	0,32	0,36	0,47	0,98	-	0,01	0,93	1,40
312 - 314	0,15	0,23	0,45	0,75	0,05	-	0,73	1,23
314 - 316	0,16	0,37	0,39	0,68	0,185	-	0,66	1,23
316 - 318	0,16	0,19	0,40	0,59	0,01	-	0,57	0,97
318 - 320	0,15	0,18	0,40	0,58	0,01	-	0,56	0,96

Tableau A.2.11

Profondeur (cm)	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}	SO ₄ ²⁻ ★ _{ex.}	NO ₃ ⁻ + SO ₄ ²⁻ ★ _{ex.} + Cl ⁻ _{ex.}
320 - 322	0,23	0,27	0,40	0,59	0,00	0,00	0,56	0,96
322 - 324	0,20	0,22	0,41	0,56	-	0,01	0,52	0,93
324 - 326	0,17	0,20	0,43	0,55	0,01	-	0,53	0,97
326 - 328	0,19	0,22	0,50	0,74	-	0,01	0,71	1,21
328 - 330	0,22	0,33	0,57	1,09	0,08	-	1,06	1,71
330 - 332	0,14	0,22	0,60	1,26	0,06	-	1,24	1,9
332 - 334	0,15	0,22	0,74	1,34	0,05	-	1,32	2,11
334 - 336	0,11	0,19	0,74	1,35	0,06	-	1,34	2,14
336 - 338	0,07	0,17	0,73	1,31	0,08	-	1,30	2,11
338 - 340	0,12	0,22	0,72	1,54	0,08	-	1,53	2,33
340 - 342	0,17	0,21	0,61	1,59	0,02	-	1,57	2,20
342 - 344	0,14	0,21	0,46	1,04	0,04	-	1,02	1,52
344 - 347	0,15	0,19	0,42	0,75	0,02	-	0,73	1,17
347 - 349	0,11	0,26	0,48	0,81	0,13	-	0,80	1,41
349 - 350	0,58	0,69	0,40	1,04	0,01	-	0,97	1,38
350 - 352	1,86	2,02	0,26	1,52	-	0,13	1,14	1,40
352 - 354	1,85	2,56	0,32	1,89	0,41	-	1,67	2,40
354 - 356	2,09	2,46	0,28	1,65	0,02	-	1,40	1,70
356 - 358	1,98	2,20	0,33	1,55	-	0,09	1,20	1,53
358 - 360	1,91	2,07	0,31	1,60	-	0,13	1,21	1,51
360 - 362	0,50	0,70	0,44	1,19	0,11	-	1,13	1,68
362 - 364	0,20	0,34	0,47	0,84	0,11	-	0,82	1,40
364 - 367	0,27	0,39	0,46	0,82	0,07	-	0,79	1,32
367 - 369	P, 18	0,30	0,39	0,77	0,09	-	0,75	1,23
369 - 371	0,19	0,31	0,42	0,72	0,09	-	0,70	1,21

Tableau A.2.11

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}
3,64 - 3,82	2,8	0,7	0,2	1,7	9,4	55	34	3,2	4,1	-
3,82 - 4,00	5,5	0,4	0,3	2,4	17,5	77	29	3,2	7,6	-
4,00 - 4,17	3,3	0,6	0,2	2,1	11,0	62	40	3,3	5,1	-
4,17 - 4,37	5,1	0,3	0,2	1,5	13,4	50	21	2,6	4,1	-
4,37 - 4,49	3,7	0,5	0,2	2,1	24,8	57	39	6,6	18,1	-
4,49 - 4,63	3,5	0,8	0,2	2,2	13,8	84	26	4,0	7,5	-
4,63 - 4,77	4,8	0,3	0,2	1,8	13,3	71	18	2,7	4,6	-
4,77 - 4,91	3,9	0,4	0,1	1,8	10,1	74	14	2,6	3,2	-
4,91 - 5,06	1,6	0,6	0,2	1,5	8,3	43	20	5,2	5,4	-
5,06 - 5,21	10,8	0,7	0,8	1,4	22,1	44	20	2,0	2,7	-
5,21 - 5,36	7,4	0,5	0,5	2,4	18,4	87	37	2,5	5,1	-
5,36 - 5,51	2,0	0,7	0,1	3,7	9,7	136	44	5,0	6,2	-
5,51 - 5,62	6,3	0,4	0,3	2,5	15,6	91	35	2,5	4,3	-
5,65 - 5,81	12,8	0,7	1,4	1,5	27,1	48	21	2,1	4,1	-
5,81 - 5,97	12,3	0,7	0,4	1,2	22,1	40	17	1,8	0,0	-
5,97 - 6,13	3,3	0,5	0,2	1,0	7,0	33	14	2,1	1,1	-
6,13 - 6,29	5,5	0,6	0,2	1,8	16,7	57	31	3,0	6,7	-
6,29 - 6,45	11,2	0,8	0,3	1,5	24,9	49	23	2,2	4,6	-
6,45 - 6,64	2,3	0,7	0,2	3,0	9,2	86	56	4,0	5,0	-
6,64 - 6,83	3,1	1,0	0,2	3,3	14,7	101	66	4,9	9,3	-

Tableau A.2.12

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}
6,83 - 7,02	4,1	0,8	0,1	2,0	12,0	69	31	2,9	4,6	-
7,02 - 7,20	1,5	0,3	0,3	2,4	5,5	78	38	3,6	2,8	-
7,20 - 7,30	6,5	1,2	0,3	3,5	23,1	119	61	3,6	11,5	-
7,30 - 7,40	7,1	0,4	0,2	1,0	12,9	38	19	1,8	0,2	-
7,40 - 7,51	3,2	1,7	0,1	1,0	6,4	30	21	2,1	0,7	-
7,51 - 7,72	5,7	0,6	0,1	2,4	17,0	59	49	3,0	6,7	-
7,72 - 7,93	4,8	1,6	0,4	1,6	11,5	46	23	2,4	2,9	-
7,93 - 8,13	6,4	0,6	0,2	2,0	13,8	56	33	2,2	2,2	-
8,13 - 8,34	14,4	1,4	0,6	1,8	27,8	50	28	1,9	1,8	-
8,34 - 8,47	10,7	0,8	0,4	2,0	21,2	74	24	2,0	1,9	-
8,47 - 8,60	5,4	1,1	0,1	3,6	19,3	108	85	3,6	9,7	-
8,60 - 8,73	5,6	0,9	0,2	2,4	18,9	65	43	3,4	8,9	-
8,73 - 8,86	7,9	0,5	0,2	1,4	17,1	39	36	2,2	2,9	-
8,86 - 8,99	7,0	0,4	0,2	1,6	14,3	29	35	2,1	1,7	-
8,99 - 9,17	5,1	1,6	0,2	2,7	19,1	55	68	3,7	9,9	-
9,17 - 9,27	10,0	1,3	0,3	2,7	23,0	45	70	2,3	5,0	-
9,27 - 9,37	12,3	1,3	0,4	2,7	21,4	38	79	1,7	-	0,4
9,37 - 9,47	1,7	0,5	0,1	2,2	12,6	51	41	7,3	9,5	-
9,47 - 9,57	18,8	1,2	0,5	2,1	27,2	46	41	2,1	4,2	-
9,57 - 9,68	11,5	1,0	0,5	1,7	30,8	32	28	2,7	10,2	-

Tableau A.2.12

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}
9,68 - 9,78	7,9	1,1	0,3	1,6	18,3	37	26	2,3	4,0	-
9,78 - 9,90	5,7	1,3	0,3	1,0	18,8	52	22	3,3	8,5	-
9,90 - 10,01	5,3	1,4	0,2	1,3	13,8	52	22	2,6	4,2	-
10,01 - 10,12	12,5	0,7	0,5	1,5	27,2	54	20	2,2	4,7	-
10,12 - 10,23	5,8	1,3	0,3	2,1	16,9	60	25	2,9	6,5	-
10,23 - 10,34	5,0	1,0	0,3	1,5	17,4	51	34	3,5	8,4	-
10,34 - 10,45	9,7	1,7	0,4	2,5	34,6	82	33	3,6	17,2	-
10,45 - 10,57	7,9	4,9	0,4	2,2	21,0	77	39	2,7	6,7	-
10,57 - 10,70	5,2	1,9	0,2	2,3	35,3	83	39	6,8	26,0	-
10,70 - 10,83	11,6	0,7	0,7	1,3	37,9	47	28	3,3	17,2	-
10,83 - 10,96	9,5	0,7	0,5	1,9	28,1	53	47	3,0	11,1	-
10,96 - 11,08	26,4	1,0	1,2	2,1	50,4	58	33	1,9	2,9	-
11,08 - 11,19	10,9	0,7	0,7	2,7	25,4	78	39	2,3	5,8	-
11,19 - 11,31	40,7	0,7	1,7	1,3	60,7	48	34	1,5	-	6,9
11,31 - 11,43	30,5	0,7	1,7	2,0	72,3	38	33	2,4	17,4	-
11,43 - 11,54	36,6	0,5	1,5	1,6	69,6	39	31	1,9	3,7	-
11,54 - 11,68	4,7	1,1	0,1	1,8	11,6	46	24	2,5	3,1	-
11,68 - 11,82	1,7	0,9	0,1	2,2	9,4	62	30	5,6	6,3	-
11,82 - 11,97	3,3	1,3	0,2	1,6	10,6	69	24	3,2	4,6	-
11,97 - 12,11	17,6	1,9	0,8	1,4	29,9	57	21	1,7	-	-0,9

Tableau A.2.12

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Cl ⁻ _{Ex.}	Na ⁺ _{ex.}
12,11 - 12,24	9,4	0,4	0,4	1,5	19,4	51	19	21	2,4	-
12,24 - 12,37	5,9	1,0	0,3	1,8	16,3	59	30	2,8	5,7	-
12,37 - 12,50	6,1	0,8	0,3	1,1	12,3	35	15	2,0	1,3	-
12,50 - 12,63	1,5	0,9	0,2	1,1	3,5	29	15	2,4	0,9	-
12,63 - 12,75	20,6	1,5	0,8	2,2	38,3	73	34	1,9	1,3	-
12,75 - 12,87	9,4	0,5	0,4	2,3	24,7	87	29	2,6	7,8	-
12,87 - 12,99	2,9	1,3	0,2	2,9	14,5	105	41	5,0	9,3	-
12,99 - 13,10	2,1	1,2	0,1	2,7	11,4	123	29	5,3	7,6	-
13,10 - 13,22	8,1	1,2	0,4	2,3	21,6	93	26	2,7	6,9	-
13,22 - 13,33	9,1	1,0	0,4	2,4	20,7	76	34	2,3	4,2	-
13,33 - 13,45	4,0	1,5	0,1	2,4	14,5	78	38	3,7	7,4	-
13,45 - 13,57	11,5	0,7	0,3	1,0	23,4	39	17	2,0	2,8	-
13,57 - 13,70	4,0	0,9	0,1	0,9	8,4	36	16	2,0	1,0	-
13,70 - 13,82	5,8	1,3	0,2	2,3	20,2	67	43	3,5	9,8	-
13,82 - 13,94	24,4	0,3	1,0	1,2	47,6	46	18	1,9	3,6	-
13,94 - 14,06	9,1	1,0	0,4	1,3	18,0	46	21	2,0	1,6	-
14,06 - 14,18	7,2	0,8	0,4	1,3	15,0	48	21	2,1	2,0	-
14,18 - 14,30	5,7	0,7	0,2	2,0	13,2	67	34	2,3	3,0	-
14,30 - 14,42	19,2	0,8	1,0	1,3	35,7	47	31	1,9	1,1	-
14,42 - 14,54	9,2	4,8	0,4	1,8	20,2	45	36	2,2	3,8	-

Tableau A.2.12

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Σ	Cl ⁻ _{ex}	SO ₄ ⁻⁻ ★ _{ex.}	H ⁺ calculée
3,64 - 3,82	0,12	0,03	0,04	0,00	1,70	0,26	0,89	0,70	0,0	3,7	0,12	0,68	1,69
3,82 - 4,00	0,24	0,05	0,02	0,01	2,38	0,49	1,25	0,61	+0,4	5,1	0,21	0,58	2,04
4,00 - 4,17	0,14	0,03	0,03	0,00	2,12	0,31	1,00	0,83	+0,2	4,5	0,14	0,81	1,95
4,17 - 4,37	0,22	0,05	0,02	0,00	1,50	0,38	0,81	0,45	+0,2	3,4	0,12	0,42	1,35
4,37 - 4,49	0,16	0,04	0,03	0,01	2,08	0,70	0,93	0,81	-0,1	4,8	0,51	0,79	2,23
4,49 - 4,63	0,15	0,03	0,04	0,00	2,20	0,39	1,36	0,55	+0,1	4,7	0,21	0,53	2,10
4,63 - 4,77	0,21	0,05	0,02	0,00	1,82	0,37	1,14	0,36	+0,2	4,0	0,13	0,33	1,60
4,77 - 4,91	0,17	0,04	0,02	0,00	1,75	0,28	1,20	0,29	+0,2	3,7	0,09	0,27	1,56
4,91 - 5,06	0,07	0,02	0,03	0,00	1,48	0,23	0,68	0,41	+0,3	2,9	0,15	0,40	1,23
5,06 - 5,21	0,47	0,11	0,04	0,02	1,32	0,62	0,70	0,41	+0,3	3,7	0,08	0,35	1,13
5,21 - 5,36	0,32	0,07	0,03	0,01	2,40	0,52	1,40	0,77	+0,1	5,5	0,14	0,73	2,27
5,36 - 5,51	0,08	0,02	0,04	0,00	3,70	0,27	2,19	0,92	+0,5	7,2	0,17	0,91	3,27
5,51 - 5,65	0,27	0,06	0,02	0,01	2,51	0,44	1,46	0,73	+0,3	5,5	0,12	0,70	2,28
5,65 - 5,81	0,56	0,13	0,04	0,01	1,50	0,76	0,77	0,44	+0,3	4,2	0,11	0,37	1,25
5,81 - 5,97	0,53	0,12	0,04	0,01	1,20	0,62	0,65	0,36	+0,3	3,5	0,00	0,30	0,95
5,97 - 6,13	0,14	0,03	0,03	0,00	1,01	0,20	0,53	0,29	+0,2	2,2	0,03	0,27	0,83
6,13 - 6,29	0,24	0,06	0,04	0,00	1,85	0,47	0,93	0,64	+0,2	4,2	0,19	0,61	1,73
6,29 - 6,45	0,49	0,11	0,04	0,01	1,50	0,70	0,80	0,48	+0,2	4,1	0,13	0,42	1,35
6,45 - 6,64	0,10	0,02	0,04	0,00	3,00	0,26	1,40	1,16	+0,3	6,0	0,14	1,15	2,69
6,64 - 6,83	0,13	0,03	0,06	0,00	3,31	0,41	1,63	1,38	+0,1	6,9	0,26	1,36	3,25

Tableau A.2.13

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Σ	Cl ⁻ ex.	SO ₄ ^{--★} ex.	H ⁺ calculée
6,83 - 7,02	0,18	0,04	0,04	0,00	2,03	0,34	1,11	0,65	+0,2	4,4	0,13	0,63	1,87
7,02 - 7,20	0,07	0,02	0,02	0,01	2,41	0,15	1,26	0,79	+0,3	4,7	0,08	0,78	2,12
7,20 - 7,30	0,28	0,06	0,07	0,01	3,50	0,65	1,92	1,28	+0,1	7,8	0,32	1,25	3,50
7,30 - 7,40	0,31	0,07	0,02	0,00	1,00	0,36	0,60	0,40	+0,0	2,8	0,01	0,36	0,97
7,40 - 7,51	0,14	0,03	0,09	0,00	1,00	0,18	0,49	0,43	+0,2	2,4	0,02	0,41	0,92
7,51 - 7,72	0,25	0,06	0,03	0,00	2,40	0,48	0,94	1,02	+0,3	5,2	0,19	0,99	2,12
7,72 - 7,93	0,21	0,05	0,09	0,01	1,58	0,32	0,74	0,39	+0,4	3,5	0,08	0,46	1,28
7,93 - 8,13	0,28	0,06	0,03	0,00	2,00	0,39	0,90	0,69	+0,4	4,4	0,06	0,66	1,62
8,13 - 8,34	0,63	0,14	0,08	0,01	1,80	0,78	0,81	0,58	+0,5	4,8	0,05	0,50	1,36
8,34 - 8,47	0,47	0,11	0,05	0,01	2,00	0,60	1,19	0,50	+0,3	4,9	0,05	0,44	1,68
8,47 - 8,60	0,23	0,05	0,06	0,00	3,60	0,54	1,74	1,78	-0,1	8,0	0,27	1,75	3,76
8,60 - 8,73	0,24	0,05	0,05	0,00	2,40	0,53	1,05	0,90	+0,3	5,2	0,25	0,87	2,17
8,73 - 8,86	0,34	0,08	0,03	0,00	1,42	0,48	0,63	0,75	0,00	3,7	0,08	0,71	1,42
8,86 - 8,99	0,30	0,07	0,02	0,00	1,62	0,40	0,47	0,73	+0,4	3,6	0,05	0,69	1,21
8,99 - 9,17	0,22	0,05	0,09	0,00	2,70	0,54	0,88	1,42	+0,2	5,9	0,28	1,39	2,55
9,17 - 9,27	0,43	0,10	0,07	0,00	2,75	0,65	0,73	1,46	+0,5	6,2	0,14	1,41	2,28
9,27 - 9,37	0,53	0,12	0,07	0,01	2,66	0,60	0,61	1,64	+0,5	6,2	0,00	1,56	2,17
9,37 - 9,47	0,07	0,02	0,03	0,00	2,20	0,35	0,83	0,86	+0,3	4,4	0,27	0,85	1,95
9,47 - 9,57	0,56	0,13	0,07	0,01	2,10	0,77	0,75	0,84	+0,5	5,2	0,12	0,77	1,64
9,57 - 9,68	0,50	0,11	0,06	0,01	1,74	0,87	0,52	0,58	+0,4	4,4	0,29	0,52	1,33

Tableau A.2.13

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Σ	Cl ⁻ ex.	SO ₄ ^{--★} ex.	H ⁺ calculée
9,68 - 9,78	0,34	0,08	0,06	0,01	1,6	0,51	0,59	0,55	+0,4	3,7	0,11	0,51	1,21
9,78 - 9,90	0,25	0,06	0,07	0,01	1,0	0,53	0,84	0,47	-0,4	3,2	0,24	0,44	1,52
9,90 - 10,01	0,23	0,05	0,08	0,00	1,3	0,39	0,84	0,47	0,0	3,4	0,12	0,44	1,40
10,01 - 10,12	0,54	0,13	0,04	0,01	1,5	0,77	0,87	0,42	+0,2	4,3	0,13	0,35	1,36
10,12 - 10,23	0,25	0,06	0,07	0,01	2,1	0,48	0,96	0,53	+0,5	4,5	0,18	0,50	1,64
10,23 - 10,34	0,22	0,05	0,06	0,01	1,5	0,49	0,82	0,71	-0,2	3,9	0,24	0,68	1,74
10,34 - 10,45	0,42	0,10	0,10	0,01	2,5	0,97	1,31	0,69	+0,2	6,1	0,48	0,64	2,43
10,45 - 10,57	0,34	0,08	0,27	0,01	2,2	0,59	1,25	0,81	+0,2	5,6	0,19	0,77	2,21
10,57 - 10,70	0,23	0,05	0,10	0,00	2,8	1,00	1,33	0,81	0,0	6,3	0,73	0,78	2,84
10,70 - 10,83	0,50	0,12	0,04	0,02	1,3	1,07	0,76	0,59	-0,4	4,4	0,48	0,53	1,77
10,83 - 10,96	0,41	0,09	0,04	0,01	1,9	0,79	0,85	0,98	-0,2	5,1	0,31	0,93	2,09
10,96 - 11,08	1,15	0,26	0,06	0,03	2,1	1,42	0,93	0,69	+0,6	6,6	0,08	0,55	1,56
11,08 - 11,19	0,47	0,11	0,04	0,02	2,7	0,72	1,26	0,80	+0,6	6,1	0,16	0,74	2,16
11,19 - 11,31	1,77	0,41	0,04	0,04	1,3	1,71	0,77	0,71	+0,4	6,8	0,00	0,14	0,91
11,31 - 11,43	1,33	0,30	0,04	0,04	2,0	2,04	0,61	0,68	+0,4	7,0	0,49	0,52	1,62
11,43 - 11,54	1,59	0,37	0,03	0,04	1,6	1,96	0,62	0,64	+0,4	6,9	0,10	0,45	1,17
11,54 - 11,68	0,21	0,05	0,06	0,00	1,8	0,33	0,74	0,50	+0,5	3,7	0,09	0,47	1,30
11,68 - 11,82	0,07	0,02	0,05	0,00	2,2	0,26	1,00	0,62	+0,5	4,2	0,18	0,61	1,79
11,82 - 11,97	0,14	0,03	0,07	0,00	1,6	0,30	1,11	0,51	-0,1	3,8	0,13	0,49	1,73
11,97 - 12,11	0,76	0,18	0,11	0,02	1,4	0,84	0,92	0,43	+0,3	4,7	0,00	0,29	1,21

Tableau A.2.13

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	ΔC	Σ	Cl ⁻ ex.	SO ₄ ⁻⁻ ★ ex.	H ⁺ calculée
12,11 - 12,24	0,41	0,09	0,02	0,01	1,49	0,55	0,83	0,39	+0,2	3,8	0,07	0,34	1,24
12,24 - 12,37	0,26	0,06	0,06	0,01	1,80	0,46	0,95	0,62	+0,2	4,2	0,16	0,59	1,70
12,37 - 12,50	0,27	0,06	0,04	0,01	1,10	0,35	0,57	0,31	+0,3	2,7	0,04	0,28	0,89
12,50 - 12,63	0,06	0,01	0,05	0,00	1,10	0,10	0,47	0,32	+0,3	2,1	0,02	0,31	0,80
12,63 - 12,75	0,89	0,20	0,08	0,02	2,19	1,08	1,18	0,70	+0,4	6,3	0,04	0,59	1,81
12,75 - 12,87	0,41	0,09	0,03	0,01	2,32	0,70	1,41	0,60	+0,1	5,6	0,22	0,55	2,18
12,87 - 12,99	0,13	0,03	0,07	0,00	2,88	0,41	1,69	0,86	+0,1	6,1	0,26	0,84	2,79
12,99 - 13,10	0,09	0,01	0,07	0,00	2,74	0,32	2,00	0,61	0,0	5,8	0,21	0,60	2,81
13,10 - 13,22	0,35	0,08	0,07	0,01	2,29	0,61	1,50	0,53	+0,2	5,4	0,20	0,49	2,20
13,22 - 13,33	0,40	0,09	0,06	0,01	2,41	0,58	1,22	0,70	+0,5	5,5	0,12	0,65	1,99
13,33 - 13,45	0,17	0,04	0,08	0,00	2,42	0,41	1,26	0,79	+0,2	5,2	0,21	0,77	2,24
13,45 - 13,57	0,50	0,11	0,04	0,01	1,02	0,66	0,63	0,35	0,0	3,3	0,08	0,29	1,00
13,57 - 13,70	0,18	0,04	0,05	0,00	0,95	0,24	0,58	0,33	+0,1	2,4	0,03	0,31	0,92
13,70 - 13,82	0,25	0,06	0,07	0,00	2,34	0,57	1,08	0,89	+0,2	5,3	0,28	0,86	2,22
13,82 - 13,94	1,06	0,24	0,02	0,03	1,17	1,34	0,75	0,37	+0,1	5,0	0,10	0,24	1,09
13,94 - 14,06	0,40	0,09	0,05	0,01	1,32	0,51	0,75	0,43	+0,2	3,6	0,04	0,38	1,17
14,06 - 14,18	0,31	0,07	0,04	0,01	1,27	0,42	0,78	0,43	+0,1	3,3	0,06	0,39	1,23
14,18 - 14,30	0,25	0,06	0,04	0,00	2,01	0,37	1,08	0,70	+0,2	4,5	0,08	0,67	1,83
14,30 - 14,42	0,84	0,19	0,04	0,03	1,33	1,01	0,76	0,64	0,0	4,8	0,03	0,54	1,33
14,42 - 14,54	0,40	0,09	0,27	0,01	1,75	0,57	0,73	0,75	+0,5	4,6	0,11	0,70	1,54

Tableau A.2.13

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/ Na	Cl ⁻ ex.	Na ⁺ ex.
77,5 - 78,4	3,0	2,1	0,8	2,3	53,6	33	35	17,9	48,2	-
78,4 - 79,3	7,8	2,0	3,3	1,8	75,0	31	47	9,6	61,0	-
79,3 - 80,2	2,2	3,5	0,8	3,0	50,3	33	37	22,8	46,3	-
80,2 - 81,1	2,5	2,7	0,6	3,1	60,8	38	64	24,3	56,2	-
81,1 - 82,0	10,0	2,3	2,1	3,6	72,2	44	55	7,2	54,2	-
82,0 - 83,0	15,6	2,2	0,8	4,4	81,6	36	83	5,2	53,5	-
83,0 - 84,2	17,3	3,5	2,3	3,9	95,0	40	77	5,5	63,9	-
84,2 - 85,3	15,2	3,0	5,0	4,1	110,6	29	83	7,3	83,2	-
85,3 - 86,5	6,5	3,4	0,6	3,9	101,0	28	59	15,5	89,3	-
86,5 - 87,7	13,1	3,1	0,8	3,0	79,7	25	60	6,1	56,1	-
87,7 - 88,9	31,2	2,2	2,1	1,4	56,0	24	35	1,8	-	0,1
88,9 - 90,0	8,9	3,1	3,2	2,4	57,2	21	32	6,4	41,2	-
90,0 - 91,2	3,9	2,2	0,9	2,3	47,2	20	17	12,1	40,2	-
91,2 - 92,3	7,0	1,2	1,1	1,9	52,0	21	36	7,4	39,4	-
92,3 - 93,5	14,7	2,0	3,1	2,6	73,5	20	88	5,0	47,0	-
93,5 - 94,7	14,6	1,4	1,9	2,5	51,8	15	68	3,5	25,5	-
94,7 - 95,9	9,1	2,2	1,4	1,1	52,5	19	37	5,8	36,1	-
95,9 - 97,0	10,3	1,2	1,6	2,2	51,8	14	35	5,0	33,2	-
97,0 - 98,2	9,2	2,9	1,4	2,3	53,4	17	38	5,8	36,9	-
98,2 - 99,3	9,8	5,6	2,9	1,9	57,6	13	33	5,9	40,0	-
99,3 - 100,5	9,9	2,7	1,6	1,9	60,0	14	36	6,1	42,2	-
105,5 - 101,7	8,3	2,1	1,0	2,5	54,0	15	37	6,5	39,1	-

Tableau A.2.14

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/ Na	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}
"Blanc"									-	-
101,7 - 102,9	10,1	1,8	1,0	2,7	66,6	15	48	6,6	48,4	-
102,9 - 104,0	8,7	5,2	1,4	2,6	67,5	13	40	7,8	51,8	-
104,0 - 105,2	11,0	1,7	5,0	2,5	79,0	17	61	7,2	59,2	-
105,2 - 106,3	2,3	1,9	1,7	3,0	66,2	16	49	28,8	62,1	-
106,3 - 107,5	2,7	3,3	1,6	2,9	67,2	13	34	24,9	62,3	-
107,5 - 108,7	5,0	7,5	2,5	2,6	71,2	15	38	14,3	62,3	-
108,7 - 109,8	4,8	2,9	3,5	3,0	84,0	20	40	17,5	75,4	-
109,8 - 111,0	2,1	1,6	1,3	2,8	71,6	11	35	34,1	67,8	-
111,0 - 112,0	4,1	2,5	0,8	3,1	71,3	12	40	17,4	63,9	-
112,0 - 113,0	16,9	3,3	2,5	3,6	88,0	14	86	5,2	57,6	-
113,0 - 114,0	16,9	2,4	2,6	3,3	76,1	14	58	4,5	45,7	-
114,0 - 115,0	14,9	3,6	1,8	3,1	85,0	13	81	5,7	58,2	-
115,0 - 116,0	14,9	3,1	1,4	3,6	80,6	9	58	5,4	53,8	-
116,0 - 117,0	14,0	2,8	0,6	2,5	74,0	13	69	5,3	48,8	-
117,0 - 118,0	14,5	1,2	1,3	2,7	71,3	16	73	4,9	45,2	-
118,0 - 119,0	13,7	1,9	2,1	2,7	66,8	16	64	4,9	42,1	-
119,0 - 120,0	13,4	0,8	3,3	2,8	67,9	9	80	5,1	43,8	-
120,0 - 121,2	15,2	3,2	2,5	2,6	76,1	12	79	5,0	48,8	-
121,2 - 122,4	17,0	3,2	1,5	2,7	82,0	12	69	4,8	51,4	-
122,4 - 123,6	19,3	2,5	2,3	1,9	79,7	10	64	4,1	45,0	-
123,6 - 124,7	20,1	1,5	1,6	2,3	86,0	10	61	4,3	49,8	-

Tableau A.2.14

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/ Na	Cl ⁻ ex.	Na ⁺ ex.
124,7 - 125,9	23,0	1,9	2,5	2,9	89,0	10	61	3,9	47,6	-
125,9 - 127,0	26,0	1,8	4,1	2,1	87,0	10	58	3,3	40,2	-
127,0 - 128,2	22,6	2,8	1,8	1,6	86,3	9	59	3,8	45,6	-
128,2 - 129,4	25,1	2,0	2,1	2,2	79,0	11	54	3,2	33,9	-
129,4 - 130,6	17,7	1,5	0,6	2,2	70,1	9	49	4,0	38,3	-
130,6 - 131,8	10,8	2,1	2,3	2,1	71,0	9	55	6,6	51,7	-
131,8 - 133,0	9,5	1,5	2,7	1,5	64,0	11	39	6,7	46,9	-
133,0 - 134,2	23,2	2,6	3,0	2,7	61,0	11	37	2,6	19,2	-
134,2 - 135,4	31,1	3,6	2,0	2,0	69,4	8	72	2,2	13,4	-
135,4 - 136,6	31,0	1,5	2,1	2,0	87,0	8	76	2,8	31,1	-
136,6 - 137,8	32,5	1,9	3,7	1,5	90,0	9	64	2,8	31,5	-
137,8 - 139,0	13,8	1,5	1,2	2,3	82,0	10	64	5,9	57,2	-
139,0 - 140,2	9,2	1,8	1,7	2,9	68,6	8	64	7,5	52,0	-
140,2 - 141,4	21,8	1,7	1,2	2,7	62,0	9	65	2,8	22,8	-
141,4 - 142,6	27,8	2,5	3,5	2,5	62,2	10	122	2,2	12,1	-
142,6 - 143,8	26,9	0,9	1,9	2,6	63,2	11	116	2,3	14,8	-
143,8 - 145,0	23,1	1,9	1,9	2,2	76,0	11	115	3,3	34,4	-
145,0 - 146,2	32,2	1,8	1,0	3,1	62,6	8	125	1,9	4,6	-
146,2 - 147,4	9,2	2,5	1,0	4,5	74,0	12	170	8,0	57,4	-
147,4 - 148,6	14,1	1,3	3,1	3,8	50,6	9	163	3,6	25,2	-
148,6 - 149,8	11,0	2,1	0,8	4,4	54,0	12	168	4,9	34,1	-
149,8 - 151,0	18,4	1,3	1,6	4,4	57,8	9	210	3,1	24,6	-

Tableau A.2.14

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl/ Na	Cl ⁻ ex.	Na ⁺ ex.
151,0 - 152,0	22,8	1,7	1,4	5,3	60,4	10	235	2,6	19,4	-
152,0 - 153,0	13,0	1,7	2,1	5,6	64,2	10	230	4,9	40,8	-
153,0 - 154,1	13,8	1,3	3,3	6,0	57,4	9	237	4,2	32,6	-
154,1 - 155,2	11,8	2,2	1,4	6,0	62,0	13	244	5,2	40,8	-
155,2 - 156,3	12,6	1,3	1,6	5,8	54,6	12	252	4,3	31,9	-
156,3 - 157,4	13,4	2,0	2,0	5,4	62,4	13	233	4,7	38,3	-
157,4 - 158,5	18,8	2,2	2,1	4,5	58,1	10	223	3,1	24,3	-
158,5 - 159,6	23,5	1,8	2,3	2,7	71,8	10	155	3,1	29,5	-
159,6 - 160,7	24,6	1,9	5,1	2,4	77,0	13	107	3,1	32,7	-
160,7 - 161,8	4,0	1,3	1,2	2,7	64,9	17	87	16,3	57,7	-
161,8 - 162,9	2,5	1,0	0,4	2,9	65,2	13	47	26,1	60,7	-
162,9 - 164,0	4,2	1,4	2,0	2,3	57,0	10	42	13,6	49,4	-
164,0 - 165,0	5,0	1,6	3,4	2,3	55,9	11	54	11,2	46,9	-
165,0 - 166,2	14,6	2,8	5,0	2,6	64,8	12	59	4,4	38,5	-
166,2 - 167,5	16,7	1,8	1,1	1,4	69,5	11	61	4,2	39,4	-
167,5 - 168,7	20,4	1,2	1,8	1,5	73,0	10	57	3,6	36,3	-
168,7 - 170,0	24,5	1,4	6,0	1,4	76,0	7	49	3,1	31,9	-
170,0 - 171,2	21,5	2,2	1,8	1,4	75,1	8	51	3,5	36,4	-
171,2 - 172,5	25,2	2,3	1,4	1,5	82,9	6	45	3,3	37,6	-
172,5 - 173,7	30,1	1,8	2,0	1,4	78,0	8	55	2,6	23,8	-
173,7 - 175,0	37,5	1,0	2,3	1,5	86,9	8	59	2,3	19,5	-

Tableau A.2.14

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/ Na	Cl ⁻ ex.	Na ⁺ ex.
175,0 - 180,0	36,9	2,3	5,0	2,4	70,5	9	87	1,9	4,1	-
180,0 - 185,0	21,0	3,5	2,5	2,8	81,0	15	116	3,9	43,2	-
185,0 - 190,0	29,0	2,3	1,0	1,3	43,7	12	83	1,5	-	4,7
190,0 - 195,0	23,1	3,0	3,1	2,0	56,5	11	80	2,4	14,9	-
195,0 - 200,0	21,3	3,0	2,5	2,6	69,9	11	78	3,3	31,6	-
200,0 - 205,0	36,8	3,3	2,1	1,1	70,3	9	61	1,9	4,1	-
205,0 - 210,0	28,7	2,6	2,0	1,8	63,0	8	81	2,2	11,3	-
210,0 - 213,0	30,0	3,2	4,0	1,7	55,0	15	100	1,8	1,0	-
213,0 - 215,0	30,1	5,2	2,0	2,0	48,0	12	112	1,6	-	3,4
215,0 - 220,0	19,5	1,8	1,9	1,8	40,9	9	69	2,1	5,8	-
220,0 - 225,0	22,3	1,2	4,0	2,4	35,4	9	90	1,6	-	2,6
225,0 - 230,0	15,0	2,5	3,0	3,5	47,6	11	130	3,2	20,6	-
230,0 - 235,0	17,5	2,0	2,6	2,4	45,4	13	119	2,6	13,9	-
235,0 - 240,0	26,6	1,5	1,7	1,4	39,5	11	69	1,5	-	4,6
240,0 - 245,0	16,7	2,2	1,9	2,2	37,9	13	67	2,3	7,9	-
245,0 - 250,0	8,0	2,2	0,7	1,6	32,6	13	50	4,1	18,2	-
250,0 - 255,0	18,0	1,0	1,5	1,8	37,5	13	67	2,1	5,1	-
255,0 - 260,0	28,0	1,5	3,0	2,0	43,7	15	84	1,6	-	3,7
260,0 - 265,0	23,0	2,3	3,0	1,8	35,2	13	59	1,5	-	3,5
265,0 - 270,0	24,0	1,7	1,8	1,5	51,1	15	74	2,1	7,9	-
270,0 - 275,0	28,0	0,9	1,4	1,4	49,5	14	73	1,8	-	0,5
275,0 - 280,0	28,5	1,6	2,9	1,3	57,3	15	76	2,0	6,0	-

Tableau A.2.14

Profondeur (cm)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Σ	Cl ⁻ _{ex.}	SO ₄ ^{--★} _{ex.}	H ⁺ calculée
77,5 - 78,4	0,13	0,03	0,12	0,02	2,29	1,51	0,52	0,72	-0,2	5,4	1,36	0,70	2,58
78,4 - 79,3	0,34	0,08	0,11	0,08	1,81	2,11	0,51	0,98	-1,2	6,0	1,72	0,94	3,17
79,3 - 80,2	0,10	0,02	0,19	0,02	2,98	1,42	0,53	0,77	+0,6	6,0	1,30	0,76	2,59
80,2 - 81,1	0,11	0,03	0,15	0,02	3,12	1,71	0,62	1,34	-0,2	7,1	1,58	1,33	3,53
81,1 - 82,0	0,43	0,10	0,13	0,05	3,56	2,03	0,71	1,15	+0,4	8,2	1,53	1,10	3,34
82,0 - 83,0	0,68	0,16	0,12	0,02	4,44	2,30	0,58	1,74	+0,8	10,0	1,51	1,66	3,75
83,0 - 84,2	0,75	0,17	0,19	0,06	3,88	2,68	0,65	1,60	+0,1	10,0	1,80	1,51	3,96
84,2 - 85,3	0,66	0,15	0,17	0,13	4,11	3,11	0,47	1,72	0,0	10,5	2,34	1,64	4,45
85,3 - 86,5	0,28	0,06	0,19	0,02	3,92	2,85	0,45	1,22	0,0	9,0	2,52	1,19	4,16
86,5 - 87,7	0,57	0,13	0,17	0,02	3,03	2,25	0,40	1,24	0,0	7,8	1,58	1,17	3,15
87,7 - 88,9	1,36	0,31	0,12	0,05	1,43	1,58	0,39	0,73	+0,6	6,0	0,00	0,57	0,96
88,9 - 90,0	0,39	0,09	0,17	0,08	2,36	1,61	0,34	0,67	+0,5	5,7	1,16	0,62	2,12
90,0 - 91,2	0,17	0,04	0,12	0,02	2,25	1,33	0,33	0,35	+0,5	4,6	1,13	0,33	1,79
91,2 - 92,3	0,30	0,07	0,07	0,03	1,94	1,46	0,33	0,74	-0,1	4,9	1,11	0,70	2,14
92,3 - 93,5	0,64	0,15	0,11	0,08	2,62	2,07	0,32	1,83	-0,6	7,8	1,32	1,75	3,39
93,5 - 94,7	0,63	0,14	0,08	0,05	2,49	1,46	0,24	1,42	+0,3	6,5	0,72	1,34	2,30
94,7 - 95,9	0,40	0,09	0,12	0,04	1,12	1,48	0,30	0,77	-0,8	4,3	1,02	0,72	2,04
95,9 - 97,0	0,45	0,10	0,07	0,04	2,17	1,46	0,22	0,73	+0,4	5,2	0,94	0,68	1,84
97,0 - 98,2	0,40	0,19	0,16	0,04	2,27	1,50	0,27	0,79	+0,5	5,6	1,04	0,74	2,05
98,2 - 99,3	0,43	0,10	0,31	0,07	1,86	1,62	0,21	0,68	+0,3	5,3	1,13	0,63	1,97
99,3 - 100,5	0,43	0,10	0,15	0,04	1,92	1,69	0,23	0,76	0,0	5,3	1,19	0,71	2,13
100,5 - 101,7	0,36	0,08	0,12	0,03	2,48	1,52	0,25	0,76	+0,5	5,6	1,10	0,72	2,07

Tableau A.2.15

Profondeur (cm)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Σ	Cl ⁻ _{ex.}	SO ₄ ^{--★} _{ex.}	calculée ^{H+}
"Blanc"													
101,7 - 102,9	0,44	0,10	0,10	0,03	2,65	1,88	0,24	0,99	+0,2	6,4	1,36	0,94	2,54
102,9 - 104,0	0,38	0,09	0,29	0,04	2,62	1,90	0,21	0,83	+0,5	6,4	1,46	0,78	2,45
104,0 - 105,2	0,48	0,11	0,09	0,13	2,53	2,22	0,28	1,27	-0,4	7,1	1,67	1,21	3,16
105,2 - 106,3	0,10	0,02	0,10	0,04	2,99	1,86	0,25	1,02	+0,1	6,4	1,75	1,01	3,01
106,3 - 107,5	0,12	0,03	0,18	0,04	2,95	1,89	0,20	0,71	+0,5	6,1	1,75	0,70	2,65
107,5 - 108,7	0,22	0,05	0,42	0,06	2,58	2,01	0,24	0,79	+0,3	6,4	1,75	0,76	2,75
108,7 - 109,8	0,21	0,05	0,16	0,09	2,99	2,37	0,32	0,84	0,0	7,0	2,12	0,81	3,25
109,8 - 111,0	0,09	0,02	0,09	0,03	2,81	2,02	0,18	0,73	+0,1	6,0	1,91	0,72	2,81
111,0 - 112,0	0,18	0,04	0,14	0,02	3,14	2,01	0,20	0,83	+0,5	6,6	1,80	0,81	2,81
112,0 - 113,0	0,73	0,17	0,18	0,06	3,57	2,48	0,22	1,79	+0,2	9,2	1,62	1,70	3,54
113,0 - 114,0	0,73	0,17	0,13	0,07	3,32	2,14	0,23	1,21	+0,8	8,0	1,29	1,12	2,64
114,0 - 115,0	0,65	0,15	0,20	0,05	3,10	2,39	0,21	1,69	-0,1	8,4	1,64	1,61	3,46
115,0 - 116,0	0,65	0,15	0,17	0,04	3,57	2,27	0,14	1,21	+1,0	8,2	1,52	1,13	2,79
116,0 - 117,0	0,61	0,14	0,16	0,02	2,47	2,08	0,21	1,44	-0,3	7,1	1,37	1,37	2,95
117,0 - 118,0	0,63	0,14	0,07	0,03	2,73	2,01	0,26	1,52	-0,2	7,4	1,27	1,44	2,97
118,0 - 119,0	0,60	0,14	0,11	0,05	2,71	1,88	0,25	1,33	+0,2	7,1	1,19	1,26	2,70
119,0 - 120,0	0,58	0,13	0,05	0,09	2,78	1,91	0,15	1,67	-0,1	7,4	1,23	1,60	3,00
120,0 - 121,0	0,66	0,15	0,18	0,06	2,61	2,14	0,19	1,65	-0,3	7,6	1,37	1,57	3,13
121,2 - 122,4	0,74	0,17	0,18	0,04	2,67	2,31	0,19	1,44	-0,1	7,7	1,45	1,35	2,99
122,4 - 123,6	0,84	0,19	0,14	0,06	1,93	2,25	0,16	1,33	-0,6	6,9	1,27	1,23	2,66
123,6 - 124,7	0,87	0,20	0,08	0,04	2,29	2,42	0,17	1,27	-0,4	7,4	1,40	1,16	2,73

Tableau A.2.15

Profondeur (cm)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	ΔC	Σ	Cl ⁻ ex.	SO ₄ ^{--★} ex.	H ⁺ calculée
124,7 - 125,9	1,00	0,23	0,11	0,06	2,90	2,51	0,16	1,27	+0,4	8,2	1,34	1,15	2,65
125,9 - 127,0	1,13	0,26	0,10	0,10	2,10	2,45	0,16	1,20	-0,1	7,5	1,13	1,06	2,35
127,0 - 128,2	0,98	0,23	0,16	0,04	1,62	2,43	0,14	1,23	-0,8	6,8	1,28	1,11	2,53
128,2 - 129,4	1,09	0,25	0,11	0,05	2,18	2,22	0,17	1,13	+0,2	7,2	0,95	1,00	2,12
129,4 - 130,6	0,77	0,18	0,08	0,02	2,16	1,97	0,15	1,01	+0,1	6,3	1,08	0,92	2,15
130,6 - 131,8	0,47	0,11	0,12	0,06	2,14	2,00	0,15	1,14	-0,4	6,2	1,46	1,08	2,69
131,8 - 133,0	0,41	0,09	0,08	0,07	1,53	1,80	0,18	0,81	-0,6	5,0	1,32	0,76	2,26
133,0 - 134,2	1,01	0,23	0,14	0,08	2,68	1,72	0,18	0,77	+1,5	6,8	0,54	0,65	1,37
134,2 - 135,4	1,35	0,31	0,20	0,05	2,00	1,95	0,13	1,51	+0,3	7,5	0,38	1,35	1,86
135,4 - 136,6	1,35	0,31	0,08	0,05	1,95	2,45	0,13	1,58	-0,4	7,9	0,88	1,42	2,43
136,6 - 137,8	1,41	0,33	0,11	0,09	1,52	2,53	0,14	1,33	-0,5	7,5	0,89	1,16	2,19
137,8 - 139,0	0,60	0,14	0,08	0,03	2,34	2,31	0,16	1,32	-0,6	7,0	1,61	1,25	3,02
139,0 - 140,2	0,40	0,09	0,10	0,04	2,91	1,93	0,13	1,33	+0,1	7,0	1,47	1,28	2,88
140,2 - 141,4	0,95	0,22	0,10	0,03	2,65	1,75	0,15	1,34	+0,7	7,2	0,64	1,23	2,02
141,4 - 142,6	1,21	0,28	0,14	0,09	2,51	1,75	0,15	2,55	-0,2	8,7	0,34	2,40	2,89
142,6 - 143,8	1,17	0,27	0,05	0,05	2,65	1,78	0,18	2,42	-0,2	8,6	0,42	2,28	2,88
143,8 - 145,0	1,00	0,23	0,11	0,05	2,18	2,14	0,17	2,40	-1,1	8,3	0,97	2,28	3,42
145,0 - 146,2	1,40	0,32	0,10	0,03	3,14	1,76	0,13	2,60	+0,5	9,5	0,13	2,43	2,69
146,2 - 147,4	0,40	0,09	0,14	0,03	4,51	2,08	0,19	3,54	-0,6	11,0	1,62	3,49	5,30
147,4 - 148,6	0,61	0,14	0,07	0,08	3,84	1,43	0,15	3,39	-0,2	9,7	0,71	3,32	4,18
148,6 - 149,8	0,48	0,11	0,12	0,02	4,36	1,52	0,20	3,49	-0,1	10,3	0,96	3,43	4,59
149,8 - 151,0	0,80	0,18	0,007	0,04	4,36	1,63	0,14	4,38	-0,7	11,6	0,69	4,28	5,11

Tableau A.2.15

Profondeur (cm)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Δc	Σ	Cl ⁻ ex.	SO ₄ ⁻ ★ ex.	H ⁺ calculée
151,0 - 152,0	0,99	0,23	0,09	0,03	5,31	1,70	0,16	4,90	-0,1	13,4	0,55	4,78	5,49
152,0 - 153,0	0,57	0,13	0,09	0,05	5,57	1,81	0,15	4,79	-0,3	13,2	1,15	4,72	6,02
153,0 - 154,1	0,60	0,14	0,07	0,08	5,98	1,62	0,14	4,94	+0,2	13,6	0,92	4,87	5,93
154,1 - 155,2	0,51	0,12	0,12	0,03	5,99	1,75	0,21	5,08	-0,3	13,8	1,15	5,02	6,38
155,2 - 156,3	0,55	0,13	0,07	0,04	5,81	1,54	0,19	5,26	-0,4	13,6	0,90	5,19	6,28
156,3 - 157,4	0,58	0,13	0,11	0,05	5,41	1,76	0,20	4,86	-0,5	13,1	1,08	4,79	6,07
157,4 - 158,5	0,82	0,19	0,12	0,05	4,53	1,64	0,16	4,65	-0,7	12,2	0,68	4,55	5,39
158,5 - 159,6	1,02	0,24	0,10	0,06	2,73	2,02	0,16	3,23	-1,3	9,6	0,83	3,11	4,10
159,6 - 160,7	1,07	0,25	0,11	0,13	2,35	2,17	0,21	2,23	-0,7	8,5	0,92	2,10	3,23
160,7 - 161,8	0,17	0,04	0,07	0,03	2,70	1,83	0,27	1,81	-0,9	6,9	1,63	1,79	3,69
161,8 - 162,9	0,11	0,02	0,06	0,01	2,85	1,84	0,21	0,98	0,0	6,1	1,71	0,97	2,89
162,9 - 164,0	0,18	0,04	0,08	0,05	2,31	1,61	0,17	0,88	0,0	5,3	1,39	0,86	2,42
164,0 - 165,0	0,22	0,05	0,09	0,09	2,29	1,57	0,18	1,13	-0,1	5,6	1,32	1,10	2,60
165,0 - 166,2	0,63	0,15	0,16	0,13	2,56	1,83	0,19	1,22	+0,4	6,9	1,08	1,14	2,41
166,2 - 167,5	0,73	0,17	0,10	0,03	1,36	1,96	0,18	1,28	-1,0	5,8	1,11	1,19	2,48
167,5 - 168,7	0,89	0,20	0,07	0,05	1,45	2,06	0,15	1,18	-0,7	6,1	1,02	1,07	2,24
168,7 - 170,0	1,07	0,25	0,08	0,15	1,37	2,14	0,12	1,01	-0,4	6,2	0,90	0,88	1,90
170,0 - 171,2	0,93	0,22	0,12	0,04	1,44	2,11	0,14	1,07	-0,6	6,1	1,03	0,96	2,13
171,2 - 172,5	1,10	0,25	0,13	0,03	1,50	2,34	0,09	0,93	-0,4	6,4	1,06	0,80	1,95
172,5 - 173,7	1,31	0,30	0,10	0,05	1,38	2,20	0,14	1,14	-0,3	6,6	0,67	0,98	1,79
173,7 - 175,0	1,63	0,38	0,06	0,06	1,46	2,45	0,13	1,24	-0,2	7,4	0,55	1,04	1,72

Tableau A.2.15

Profondeur (cm)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	ΔC	Σ	Cl ⁻ _{ex.}	SO ₄ ^{--★} _{ex.}	calculée ^{H+}
175,0 - 180,0	1,60	0,37	0,13	0,13	2,35	1,99	0,15	1,81	+0,6	8,5	0,11	1,62	1,88
180,0 - 185,0	0,91	0,21	0,19	0,06	2,76	2,28	0,24	2,42	-0,8	9,1	1,22	2,31	3,77
185,0 - 190,0	1,26	0,29	0,13	0,03	1,34	1,23	0,19	1,72	-0,1	6,2	0,00	1,32	1,51
190,0 - 195,0	1,00	0,23	0,17	0,08	2,02	1,59	0,17	1,67	+0,1	6,9	0,42	1,55	2,14
195,0 - 200,0	0,93	0,21	0,17	0,06	2,58	1,97	0,17	1,63	+0,2	7,7	0,89	1,52	2,58
200,0 - 205,0	1,60	0,37	0,18	0,05	1,08	1,98	0,14	1,26	-0,1	6,7	0,12	1,07	1,33
205,0 - 210,0	1,25	0,29	0,14	0,05	1,79	1,77	0,12	1,69	-0,1	7,1	0,32	1,54	1,98
210,0 - 213,0	1,30	0,30	0,18	0,10	1,69	1,55	0,25	2,08	-0,3	7,5	0,03	1,92	2,20
213,0 - 215,0	1,31	0,30	0,29	0,05	2,04	1,35	0,20	2,33	+0,1	7,9	0,00	1,99	2,19
215,0 - 220,0	0,85	0,20	0,10	0,05	1,79	1,15	0,14	1,44	+0,3	5,7	0,16	1,34	1,64
220,0 - 225,0	0,97	0,22	0,07	0,10	2,37	1,00	0,15	1,88	+0,7	6,8	0,00	1,63	1,78
225,0 - 230,0	0,65	0,15	0,14	0,08	3,53	1,34	0,17	2,71	+0,3	8,8	0,58	2,63	3,38
230,0 - 235,0	0,76	0,18	0,11	0,07	2,35	1,28	0,21	2,48	-0,5	7,4	0,39	2,39	3,00
235,0 - 240,0	1,16	0,27	0,08	0,04	1,35	1,11	0,18	1,44	+0,2	5,6	0,00	1,05	1,23
240,0 - 245,0	0,73	0,17	0,12	0,05	2,20	1,07	0,20	1,40	+0,6	5,9	0,22	1,31	1,73
245,0 - 250,0	0,35	0,08	0,12	0,02	1,62	0,92	0,21	1,04	0,0	4,4	0,51	1,00	1,72
250,0 - 255,0	0,78	0,18	0,06	0,04	1,80	1,06	0,21	1,40	+0,2	5,5	0,14	1,31	1,66
255,0 - 260,0	1,22	0,28	0,08	0,08	1,99	1,23	0,24	1,74	+0,4	6,9	0,00	1,40	1,64
260,0 - 265,0	1,00	0,23	0,13	0,08	1,77	0,99	0,20	1,23	+0,8	5,6	0,00	0,93	1,13
265,0 - 270,0	1,04	0,24	0,09	0,05	1,52	1,44	0,24	1,55	-0,3	6,2	0,22	1,43	1,88
270,0 - 275,0	1,22	0,28	0,05	0,04	1,41	1,39	0,23	1,51	-0,1	6,1	0,00	1,33	1,56
275,0 - 280,0	1,24	0,29	0,09	0,07	1,28	1,61	0,24	1,58	-0,5	6,4	0,17	1,43	1,84

Tableau A.2.15

Profondeur (m de neige)	% HCl	% HNO ₃	% H ₂ SO ₄	Profondeur (m de neige)	% HCl	% HNO ₃	% H ₂ SO ₄
7,30 - 7,40	1	62	37	9,90 - 10,01	8	62	30
7,40 - 7,51	2	53	45	10,01 - 10,12	10	64	26
7,51 - 7,72	9	44	47	10,12 - 10,23	11	59	30
7,72 - 7,93	6	58	36	10,23 - 10,34	14	47	39
7,93 - 8,13	4	55	41	10,34 - 10,45	20	54	26
8,13 - 8,34	4	60	36	10,45 - 10,57	9	57	34
8,34 - 8,47	3	71	26	10,57 - 10,70	26	47	27
8,47 - 8,60	7	46	47	10,70 - 10,83	27	43	30
8,60 - 8,73	11	49	40	10,83 - 10,96	15	41	44
8,73 - 8,86	6	44	50	10,96 - 11,08	5	60	35
8,86 - 8,99	4	39	57	11,08 - 11,19	7	58	35
8,99 - 9,17	11	34	55	11,19 - 11,31	0	85	15
9,17 - 9,27	6	32	62	11,31 - 11,43	30	38	32
9,27 - 9,37	0	28	72	11,43 - 11,54	9	53	38
9,37 - 9,47	14	43	43	11,54 - 11,68	7	57	36
9,47 - 9,57	7	46	47	11,68 - 11,82	10	56	34
9,57 - 9,68	22	39	39	11,82 - 11,97	8	64	28
9,68 - 9,78	9	49	42	11,97 - 12,11	0	76	24
9,78 - 9,90	16	55	29				

Tableau A.2.16

Profondeur (m de glace)	% HCl	% HNO ₃	% H ₂ SO ₄	Profondeur (m de glace)	% HCl	% HNO ₃	% H ₂ SO ₄
2,25 - 2,27	11	28	61	2,64 - 2,66	0	36	64
2,27 - 2,29	5	35	60	2,66 - 2,68	0	40	60
2,29 - 2,31	5	36	59	2,68 - 2,70	0	46	54
2,31 - 2,33	6	38	56	2,70 - 2,72	0	50	50
2,33 - 2,35	6	40	54	2,72 - 2,73	0	50	50
2,35 - 2,37	5	41	54	2,73 - 2,75	0	52	48
2,37 - 2,39	5	39	56	2,75 - 2,76	0	57	43
2,39 - 2,41	5	40	55	2,76 - 2,78	0	52	48
2,41 - 2,43	6	41	53	2,78 - 2,80	0	58	42
2,43 - 2,45	5	47	48	2,80 - 2,82	0	35	65
2,45 - 2,47	2	51	47	2,82 - 2,84	0	40	60
2,47 - 2,49	3	48	49	2,84 - 2,86	0	49	51
2,50 - 2,52	5	48	47	2,86 - 2,88	0	42	57
2,52 - 2,54	7	53	40	2,88 - 2,90	0	29	71
2,54 - 2,56	8	50	42	2,90 - 2,92	0	31	69
2,56 - 2,58	5	33	62	2,92 - 2,94	0	38	71
2,58 - 2,60	0	25	75	2,94 - 2,96	0	42	58
2,60 - 2,62	0	26	74	2,96 - 2,98	5	38	57
2,62 - 2,64	0	33	67	2,98 - 3,00	0	40	60

Tableau A.2.17

Profondeur (m de glace)	% HCl	% HNO ₃	% H ₂ SO ₄	Profondeur (m de glace)	% HCl	% HNO ₃	% H ₂ SO ₄
3,00 - 3,02	0	30	70	3,36 - 3,38	4	35	61
3,02 - 3,04	1	23	76	3,38 - 3,40	3	31	66
3,04 - 3,06	3	23	74	3,40 - 3,42	1	28	71
3,06 - 3,08	0	25	75	3,42 - 3,44	3	30	67
3,08 - 3,10	0	25	75	3,44 - 3,47	2	36	62
3,10 - 3,12	0	33	67	3,47 - 3,49	9	34	57
3,12 - 3,14	4	36	59	3,49 - 3,50	1	29	70
3,14 - 3,16	15	31	54	3,50 - 3,52	0	19	81
3,16 - 3,18	1	41	58	3,52 - 3,54	17	13	70
3,18 - 3,20	1	42	57	3,54 - 3,56	1	16	83
3,20 - 3,22	0	42	58	3,56 - 3,58	0	22	78
3,22 - 3,24	0	44	56	3,58 - 3,60	0	20	80
3,24 - 3,26	1	44	55	3,60 - 3,62	7	26	67
3,26 - 3,28	0	41	59	3,62 - 3,64	8	34	58
3,28 - 3,30	5	33	62	3,64 - 3,67	5	35	60
3,30 - 3,32	3	32	65	3,67 - 3,69	7	32	61
3,32 - 3,34	2	35	63	3,69 - 3,71	7	35	58
3,34 - 3,36	3	35	62				

Tableau A.2.17

Profondeur (m de neige)	% HCl	% HNO ₃	% H ₂ SO ₄	Profondeur (m de neige)	% HCl	% HNO ₃	% H ₂ SO ₄	Profondeur (m de neige)	% HCl	% HNO ₃	% H ₂ SO ₄
2,00 - 2,02	16	51	33	2,34 - 2,36	13	41	46	2,68 - 2,70	14	53	33
2,02 - 2,04	16	52	32	2,36 - 2,38	0	43	57	2,70 - 2,72	15	39	46
2,04 - 2,06	18	48	34	2,38 - 2,40	11	48	41	2,72 - 2,74	26	29	45
2,06 - 2,08	9	52	39	2,40 - 2,42	9	50	41	2,74 - 2,76	40	27	33
2,08 - 2,10	8	53	39	2,42 - 2,44	13	45	42	2,76 - 2,78	29	30	41
2,10 - 2,12	15	50	35	2,44 - 2,46	5	50	45	2,78 - 2,80	22	34	44
2,12 - 2,14	15	51	34	2,46 - 2,48	12	50	38	2,80 - 2,82	12	33	55
2,14 - 2,16	15	49	36	2,48 - 2,50	14	51	35	2,82 - 2,84	6	35	59
2,16 - 2,18	13	49	38	2,50 - 2,52	15	48	37	2,84 - 2,86	13	34	53
2,18 - 2,20	15	53	32	2,52 - 2,54	13	49	38	2,86 - 2,88	11	33	56
2,20 - 2,22	13	40	47	2,54 - 2,56	21	43	36	2,88 - 2,90	19	28	53
2,22 - 2,24	10	44	46	2,56 - 2,58	19	37	44	2,90 - 2,92	10	25	65
2,24 - 2,26	12	39	49	2,58 - 2,60	19	44	37	2,92 - 2,94	3	27	70
2,26 - 2,28	13	37	50	2,60 - 2,62	22	42	36	2,94 - 2,96	7	25	68
2,28 - 2,30	13	42	45	2,62 - 2,64	23	41	36	2,96 - 2,98	2	27	71
2,30 - 2,32	14	44	42	2,64 - 2,66	18	47	35	2,98 - 3,00	4	23	73
2,32 - 2,34	11	35	54	2,66 - 2,68	12	52	36	3,00 - 3,02	11	27	62

Tableau A.2.18

Profondeur (m de neige)	% HCl	% HNO ₃	% H ₂ SO ₄	Profondeur (m de neige)	% HCl	% HNO ₃	% H ₂ SO ₄	Profondeur (m de neige)	% HCl	% HNO ₃	% H ₂ SO ₄
3,02 - 3,04	8	29	63	3,36 - 3,38	20	51	29	3,70 - 3,72	17	60	23
3,04 - 3,06	6	29	65	3,38 - 3,40	14	55	31	3,72 - 3,74	19	42	39
3,06 - 3,08	14	29	57	3,40 - 3,42	15	53	32	3,74 - 3,76	24	44	32
3,08 - 3,10	6	31	63	3,42 - 3,44	9	57	34	3,76 - 3,78	14	53	33
3,10 - 3,12	11	32	57	3,44 - 3,46	22	47	31	3,78 - 3,80	21	49	30
3,12 - 3,14	17	39	44	3,46 - 3,48	16	53	31	3,80 - 3,82	15	55	30
3,14 - 3,16	22	43	35	3,48 - 3,50	19	54	27	3,82 - 3,84	20	53	27
3,16 - 3,18	21	46	33	3,50 - 3,52	14	56	30	3,84 - 3,86	22	48	30
3,18 - 3,20	21	48	31	3,52 - 3,54	19	54	27	3,86 - 3,88	12	29	59
3,20 - 3,22	18	50	32	3,54 - 3,56	21	48	31	3,88 - 3,90	18	42	40
3,22 - 3,24	18	54	28	3,56 - 3,58	19	48	33	3,90 - 3,92	22	44	34
3,24 - 3,26	15	57	28	3,58 - 3,60	22	49	29	3,92 - 3,94	21	45	34
3,26 - 3,28	25	51	24	3,60 - 3,62	21	54	25	3,94 - 3,96	19	47	34
3,28 - 3,30	15	58	27	3,62 - 3,64	14	57	29	3,96 - 3,98	9	55	36
3,30 - 3,32	14	54	32	3,64 - 3,66	14	55	31	3,98 - 4,00	19	46	35
3,32 - 3,34	25	34	41	3,66 - 3,68	13	58	29	-	-	-	-
3,34 - 3,36	19	53	28	3,68 - 3,70	12	60	28	-	-	-	-

Tableau A.2.18

Tableau A.2.19

Profondeur (m de neige)	% HCl	% HNO ₃	% H ₂ SO ₄	Profondeur (m de neige)	% HCl	% HNO ₃	% H ₂ SO ₄	Profondeur (m de neige)	% HCl	% HNO ₃	% H ₂ SO ₄
1,15 - 1,16	54	5	41	1,37 - 1,38	41	6	53	1,58 - 1,60	20	4	76
1,16 - 1,17	47	7	46	1,38 - 1,39	53	5	42	1,60 - 1,61	28	6	66
1,17 - 1,18	43	9	48	1,39 - 1,40	52	4	54	1,61 - 1,62	44	7	49
1,18 - 1,19	44	9	57	1,40 - 1,41	32	7	61	1,62 - 1,63	59	7	34
1,19 - 1,20	41	5	54	1,41 - 1,43	12	5	83	1,63 - 1,64	58	7	35
1,20 - 1,21	44	6	50	1,43 - 1,44	15	6	79	1,64 - 1,65	51	7	42
1,21 - 1,22	48	6	46	1,44 - 1,45	28	5	67	1,65 - 1,66	45	8	47
1,22 - 1,23	48	6	46	1,45 - 1,46	5	5	90	1,66 - 1,67	45	7	48
1,23 - 1,25	51	6	43	1,46 - 1,47	31	3	66	1,67 - 1,69	46	7	47
1,25 - 1,26	51	6	43	1,47 - 1,48	17	3	80	1,69 - 1,70	47	6	47
1,26 - 1,27	48	7	45	1,48 - 1,50	21	4	75	1,70 - 1,71	48	7	45
1,27 - 1,28	50	6	44	1,50 - 1,51	14	3	83	1,71 - 1,72	54	5	41
1,28 - 1,29	45	8	47	1,51 - 1,52	10	3	87	1,72 - 1,74	37	8	55
1,29 - 1,31	50	7	43	1,52 - 1,53	19	2	79	1,74 - 1,75	32	8	60
1,31 - 1,32	54	6	40	1,53 - 1,54	16	2	82	1,75 - 1,80	6	8	86
1,32 - 1,33	58	8	34	1,54 - 1,55	18	3	79	1,80 - 1,85	32	6	62
1,33 - 1,34	39	13	48	1,55 - 1,56	14	3	83	1,85 - 1,90	0	12	88
1,34 - 1,35	20	7	73	1,56 - 1,57	18	3	79	1,90 - 1,95	20	8	72
1,35 - 1,37	36	5	59	1,57 - 1,58	13	3	84	1,95 - 2,00	35	6	59

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}
2,00 - 2,17	14,5	0,5	0,3	2,9	53,0	14	94	3,7	27,0	-
2,17 - 2,30	13,6	0,5	0,7	2,0	28,0	14	75	2,1	3,6	-
2,30 - 2,57	17,1	1,0	2,0	1,6	29,5	13	74	1,7	-	0,6
2,57 - 2,70	20,4	2,0	1,5	1,8	35,6	16	85	1,8	-	0,6
2,70 - 2,84	15,7	1,5	1,0	1,5	39,0	13	55	2,5	10,7	-
2,84 - 3,01	6,6	0,5	0,5	2,3	25,1	17	68	3,8	13,2	-
3,01 - 3,18	9,0	2,3	0,5	1,8	28,3	17	68	3,2	12,1	-
3,18 - 3,37	16,6	1,0	1,0	1,6	30,4	15	63	1,8	0,6	-
3,37 - 3,56	24,6	0,5	0,7	1,5	47,0	14	71	1,9	2,8	-
3,56 - 3,66	14,4	1,5	0,7	2,0	43,5	12	69	3,0	17,7	-
3,66 - 3,76	16,7	0,5	0,7	2,3	46,6	15	71	2,8	16,5	-
3,76 - 3,88	14,1	1,0	0,5	2,6	55,5	22	69	4,0	30,2	-
3,88 - 4,01	14,2	0,5	0,7	3,0	83,0	25	61	5,8	57,4	-
4,01 - 4,17	30,0	0,5	1,3	2,0	58,9	22	70	2,0	4,9	-
4,17 - 4,32	19,5	0,5	5,3	2,5	52,4	22	65	2,7	17,4	-
4,32 - 4,42	26,6	0,5	1,3	1,6	41,9	24	68	1,6	-	3,3
4,42 - 4,53	21,2	0,5	2,2	2,2	45,2	29	64	2,1	7,0	-
4,53 - 4,70	26,6	0,5	1,3	2,5	55,3	27	98	2,1	7,3	-
4,70 - 4,82	6,5	4,5	0,5	2,4	39,7	27	44	6,1	27,9	-
4,82 - 4,94	12,6	1,0	0,5	2,5	48,2	21	45	3,8	25,5	-
4,94 - 5,05	12,8	0,5	0,7	2,2	35,6	22	62	2,8	12,5	-
5,05 - 5,18	25,4	1,0	1,1	1,8	38,1	21	62	1,5	-	4,3
5,18 - 5,29	31,2	2,0	3,1	1,6	27,3	19	81	0,9	-	16,0
5,29 - 5,41	19,8	4,5	0,9	0,8	15,4	17	50	0,8	-	11,2
5,41 - 5,51	25,0	1,5	0,8	0,8	17,7	15	60	0,7	-	15,2
5,51 - 5,61	19,0	0,5	0,5	1,3	19,6	15	63	1,0	-	8,1

Tableau A.2.20

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}
5,61 - 5,70	25,7	0,5	0,5	1,1	15,6	15	76	0,6	-	17,0
5,70 - 5,78	34,1	1,6	1,8	0,7	13,1	15	59	0,4	-	26,8
5,78 - 5,85	16,6	1,3	0,8	1,6	23,1	17	67	1,4	-	3,8
5,85 - 5,92	17,1	3,3	1,1	2,5	32,1	13	94	1,9	1,4	-
5,92 - 6,00	19,5	2,4	0,9	1,9	29,1	11	68	1,5	-	3,3
6,00 - 6,08	33,5	1,6	1,8	1,2	27,7	17	63	0,8	-	18,1
6,08 - 6,17	17,6	2,1	1,5	1,3	18,6	13	49	1,1	-	7,3
6,17 - 6,23	32,0	1,5	1,1	0,9	20,9	19	70	0,7	-	20,4
6,23 - 6,30	25,6	1,2	0,8	1,2	14,2	14	63	0,6	-	17,7
6,30 - 6,36	34,7	2,7	1,7	1,3	18,6	19	84	0,5	-	24,4
6,36 - 6,43	7,2	1,8	1,7	2,3	12,0	14	88	1,7	-	0,6
6,43 - 6,49	4,7	2,0	0,8	3,2	12,8	15	119	2,8	4,4	-
6,49 - 6,55	7,5	0,9	0,2	2,1	16,5	19	76	2,2	2,9	-
6,55 - 6,60	9,5	2,3	0,8	1,6	11,4	17	59	1,2	-	3,2
6,60 - 6,66	11,7	2,1	0,8	1,3	16,6	17	60	1,4	-	2,5
6,66 - 6,73	21,9	1,3	0,8	1,5	37,4	17	67	1,7	-	1,1
6,73 - 6,80	18,6	2,0	1,1	2,4	44,9	13	80	2,4	11,5	-
6,80 - 6,87	23,5	2,0	1,1	2,2	46,0	14	79	2,0	3,7	-
6,87 - 6,94	63,6	2,7	3,1	1,2	87,0	22	71	1,4	-	15,2
6,94 - 7,01	5,4	4,5	0,2	2,8	46,0	24	53	8,5	36,2	-
7,01 - 7,07	18,7	5,0	0,2	3,5	79,0	23	68	4,2	45,5	-
7,07 - 7,14	8,4	2,8	1,7	3,7	72,0	19	81	8,6	56,7	-
7,14 - 7,20	0,8	0,7	0,2	2,8	37,0	17	41	45,0	35,3	-
7,20 - 7,27	18,9	0,7	0,8	2,0	25,0	18	77	1,3	-	5,2
7,27 - 7,34	12,5	0,8	0,7	2,5	24,0	13	100	1,9	1,5	-
7,34 - 7,46	13,3	1,2	1,5	2,1	26,0	16	92	2,0	2,1	-

Tableau A.2.20

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Cl ⁻ _{ex}	Na ⁺ _{ex}
7,46 - 7,57	31,5	3,3	2,0	0,9	17,8	17	90	0,6	-	21,6
7,57 - 7,64	23,0	5,0	1,5	1,1	13,4	18	90	0,6	-	15,6
7,64 - 7,71	14,9	0,4	1,0	2,6	14,9	14	126	1,0	-	6,6
7,71 - 7,80	13,7	0,4	0,5	2,4	13,0	16	115	1,0	-	6,5
7,80 - 7,88	18,8	0,7	1,5	2,9	18,2	18	166	1,0	-	8,7
7,88 - 7,97	11,4	4,4	0,5	2,5	11,8	18	115	1,0	-	4,8
7,97 - 8,05	21,6	4,6	1,5	0,9	13,9	18	74	0,6	-	13,9
8,05 - 8,12	40,3	0,4	1,5	0,8	37,6	27	66	0,9	-	19,4
8,12 - 8,20	24,2	0,9	1,5	1,1	25,4	17	55	1,1	-	10,1
8,20 - 8,27	21,9	5,0	1,7	0,6	19,8	17	58	0,9	-	10,9
8,27 - 8,34	20,7	0,5	1,5	1,1	15,2	17	68	0,7	-	12,2
8,34 - 8,40	19,1	0,1	0,2	1,2	12,0	15	68	0,6	-	12,4
8,40 - 8,48	15,9	0,7	0,5	1,7	15,5	16	71	1,0	-	7,3
8,48 - 8,56	14,9	0,7	1,0	1,0	15,5	14	60	1,0	-	6,3
8,56 - 8,64	32,8	0,7	1,5	1,1	21,6	16	75	0,7	-	20,8
8,64 - 8,72	19,2	1,5	1,0	1,7	25,1	12	81	1,3	-	5,2
8,78 - 8,81	23,0	0,8	1,0	1,4	26,7	15	77	1,2	-	8,2
8,81 - 8,90	23,0	3,4	4,0	1,3	21,2	15	63	0,9	-	11,2
8,90 - 8,97	28,1	0,3	2,0	0,8	19,0	23	57	0,7	-	17,5
8,97 - 9,04	7,5	0,2	0,5	2,3	11,7	11	90	1,6	-	1,0
9,04 - 9,10	26,1	0,2	1,5	1,3	19,8	17	79	0,8	-	15,1
9,10 - 9,19	31,4	0,1	1,5	0,7	19,9	19	58	0,6	-	20,3
9,19 - 9,28	17,3	0,2	1,5	1,5	13,8	13	75	0,8	-	9,6
9,28 - 9,37	28,9	0,7	1,5	2,0	20,3	14	120	0,7	-	17,6
9,37 - 9,47	21,1	0,5	0,5	1,6	19,5	13	96	0,9	-	10,3
9,47 - 9,57	22,8	4,3	1,0	0,8	13,7	16	63	0,6	-	15,2

Tableau A.2.20

Tableau A.2.21

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Σ	Cl ⁻ _{ex.}	SO ₄ ^{--★} _{ex.}	H ⁺ calculée
2,00 - 2,17	0,63	0,14	0,03	0,01	2,88	1,49	0,22	1,95	0,0	7,4	0,76	1,87	2,85
2,17 - 2,30	0,59	0,14	0,03	0,02	1,99	0,79	0,22	1,56	+0,2	5,3	0,10	1,49	1,81
2,30 - 2,57	0,74	0,17	0,06	0,05	1,60	0,83	0,21	1,53	0,0	5,2	0,00	1,41	1,62
2,57 - 2,70	0,88	0,20	0,11	0,04	1,83	1,00	0,26	1,77	0,0	6,1	0,00	1,64	1,90
2,70 - 2,84	0,68	0,16	0,08	0,03	1,53	1,10	0,21	1,15	0,0	4,9	0,31	1,07	1,58
2,84 - 3,01	0,29	0,07	0,03	0,01	2,25	0,71	0,27	1,41	+0,3	5,0	0,37	1,37	2,01
3,01 - 3,18	0,39	0,09	0,13	0,01	1,80	0,80	0,27	1,41	-0,1	4,9	0,35	1,36	1,97
3,18 - 3,37	0,72	0,17	0,06	0,03	1,56	0,86	0,24	1,31	+0,1	5,0	0,02	1,22	1,48
3,37 - 3,56	1,07	0,25	0,03	0,02	1,49	1,32	0,23	1,47	-0,2	5,9	0,07	1,34	1,64
3,56 - 3,66	0,62	0,14	0,08	0,02	2,02	1,23	0,20	1,43	0,0	5,7	0,51	1,35	2,06
3,66 - 3,76	0,73	0,17	0,03	0,02	2,29	1,31	0,24	1,49	+0,2	6,3	0,46	1,40	2,10
3,76 - 3,89	0,61	0,14	0,06	0,01	2,57	1,56	0,35	1,44	0,0	6,7	0,85	1,36	2,56
3,89 - 4,02	0,62	0,14	0,03	0,02	2,96	2,34	0,41	1,26	-0,3	7,8	1,62	1,18	3,21
4,02 - 4,17	1,30	0,30	0,03	0,03	2,03	1,66	0,35	1,46	+0,2	7,2	0,15	1,30	1,79
4,17 - 4,32	0,85	0,20	0,03	0,14	2,52	1,48	0,36	1,36	+0,4	6,9	0,49	1,25	2,10
4,32 - 4,42	1,16	0,27	0,03	0,03	1,61	1,18	0,38	1,42	+0,1	6,1	0,00	1,10	1,48
4,42 - 4,53	0,92	0,21	0,03	0,06	2,15	1,27	0,46	1,34	+0,3	6,4	0,20	1,23	1,89
4,53 - 4,70	1,16	0,27	0,03	0,03	2,52	1,56	0,44	2,04	0,0	8,1	0,21	1,90	2,55
4,70 - 4,82	0,28	0,07	0,25	0,01	2,36	1,12	0,44	0,91	+0,5	5,4	0,79	0,87	2,10
4,82 - 4,94	0,55	0,13	0,06	0,01	2,45	1,36	0,33	0,94	+0,6	5,8	0,72	0,87	1,92
4,94 - 5,05	0,56	0,13	0,03	0,02	2,18	1,00	0,35	1,28	+0,3	5,6	0,35	1,21	1,91
5,05 - 5,18	1,11	0,26	0,06	0,03	1,83	1,07	0,33	1,28	+0,6	6,0	0,00	0,92	1,25
5,18 - 5,29	1,36	0,31	0,11	0,08	1,57	0,77	0,30	1,70	+0,6	6,2	0,00	0,72	1,02
5,29 - 5,41	0,86	0,20	0,25	0,02	0,75	0,43	0,27	1,04	+0,3	3,8	0,00	0,36	0,63
5,41 - 5,51	1,09	0,25	0,08	0,02	0,80	0,50	0,25	1,25	+0,2	4,2	0,00	0,34	0,59
5,51 - 5,61	0,83	0,19	0,03	0,01	1,30	0,55	0,25	1,31	+0,3	4,5	0,00	0,79	1,05

Tableau A.2.21

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Σ	Cl ⁻ ex.	SO ₄ ^{--★} ex.	H ⁺ calculée
5,61 - 5,70	1,12	0,26	0,03	0,01	1,10	0,44	0,25	1,58	+0,3	4,8	0,00	0,58	0,83
5,70 - 5,78	1,48	0,34	0,09	0,05	0,65	0,37	0,24	1,23	+0,8	4,5	0,00	0,02	0,26
5,78 - 5,85	0,72	0,17	0,07	0,02	1,62	0,65	0,28	1,40	+0,3	4,9	0,00	1,12	1,40
5,85 - 5,92	0,74	0,17	0,18	0,03	2,50	0,90	0,21	1,95	+0,5	6,7	0,04	1,86	2,11
5,92 - 6,00	0,85	0,19	0,13	0,2	1,92	0,82	0,17	1,41	+0,7	5,5	0,00	1,13	1,30
6,00 - 6,08	1,46	0,33	0,09	0,05	1,15	0,78	0,27	1,31	+0,7	5,5	0,00	0,21	0,48
6,08 - 6,17	0,77	0,18	0,12	0,04	1,33	0,52	0,22	1,01	+0,6	4,2	0,00	0,54	0,76
6,17 - 6,23	1,39	0,32	0,08	0,03	0,90	0,59	0,30	1,45	+0,4	5,1	0,00	0,25	0,55
6,23 - 6,30	1,11	0,26	0,07	0,02	1,17	0,40	0,23	1,32	+0,7	4,6	0,00	0,29	0,52
6,30 - 6,36	1,51	0,35	0,15	0,04	1,30	0,52	0,30	1,74	+0,8	5,9	0,00	0,31	0,62
6,36 - 6,43	0,31	0,07	0,10	0,04	2,30	0,34	0,22	1,82	+0,4	5,2	0,00	1,76	1,98
6,43 - 6,49	0,20	0,05	0,11	0,02	3,17	0,36	0,25	2,47	+0,4	6,6	0,12	2,45	2,82
6,49 - 6,55	0,33	0,08	0,05	0,00	2,14	0,46	0,31	1,58	+0,2	5,0	0,08	1,54	1,94
6,55 - 6,60	0,41	0,10	0,13	0,02	1,55	0,32	0,27	1,23	+0,4	4,0	0,00	1,02	1,29
6,60 - 6,66	0,51	0,12	0,12	0,02	1,31	0,47	0,28	1,24	+0,1	4,1	0,00	1,05	1,33
6,66 - 6,73	0,95	0,22	0,07	0,02	1,46	1,05	0,27	1,40	0,0	5,4	0,00	1,22	1,49
6,73 - 6,80	0,81	0,19	0,11	0,03	2,38	1,26	0,22	1,66	+0,3	6,7	0,32	1,56	2,10
6,80 - 6,87	1,02	0,23	0,11	0,03	2,20	1,30	0,23	1,65	+0,4	6,8	0,10	1,52	1,85
6,87 - 6,94	2,77	0,64	0,15	0,08	1,20	2,45	0,35	1,47	+0,5	9,1	0,00	0,35	0,70
6,94 - 7,01	0,23	0,05	0,25	0,00	2,75	1,30	0,39	1,10	+0,5	6,1	1,02	1,07	2,48
7,01 - 7,07	0,81	0,19	0,28	0,00	3,50	2,23	0,37	1,42	+0,8	8,8	1,29	1,32	2,97
7,07 - 7,14	0,37	0,08	0,15	0,04	3,70	2,02	0,31	1,69	+0,3	8,4	1,59	1,64	3,55
7,14 - 7,20	0,04	0,01	0,04	0,00	2,75	1,03	0,28	0,85	+0,7	5,0	0,99	0,84	2,10
7,20 - 7,27	0,82	0,19	0,04	0,02	2,00	0,69	0,29	1,60	+0,5	5,7	0,00	1,23	1,52

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Σ	Cl ⁻ ex.	SO ₄ ^{--★} ex.	H ⁺ calculée
7,27 - 7,34	0,54	0,12	0,04	0,02	2,46	0,68	0,20	2,08	+0,2	6,1	0,04	2,01	2,26
7,34 - 7,46	0,58	0,13	0,07	0,04	2,15	0,73	0,26	1,92	0,0	5,9	0,06	1,84	2,16
7,46 - 7,57	1,37	0,32	0,18	0,05	0,90	0,50	0,28	1,88	+0,1	5,4	0,00	0,61	0,89
7,57 - 7,64	1,00	0,23	0,28	0,04	1,10	0,38	0,29	1,87	+0,1	5,2	0,00	0,96	1,25
7,64 - 7,71	0,65	0,15	0,02	0,03	2,60	0,42	0,22	2,61	+0,2	6,7	0,00	2,19	2,41
7,71 - 7,80	0,60	0,14	0,02	0,01	2,43	0,37	0,25	2,40	+0,2	6,2	0,00	2,00	2,25
7,80 - 7,88	0,82	0,19	0,04	0,04	2,89	0,51	0,28	3,45	-0,3	8,2	0,00	2,90	3,18
7,88 - 7,97	0,50	0,11	0,24	0,01	2,47	0,33	0,28	2,39	+0,3	6,3	0,00	2,08	2,36
7,97 - 8,05	0,94	0,22	0,26	0,04	0,94	0,39	0,28	1,55	+0,2	4,6	0,00	0,73	1,01
8,05 - 8,12	1,75	0,40	0,02	0,04	0,81	1,06	0,44	1,38	+0,1	5,9	0,00	0,18	0,62
8,12 - 8,20	1,05	0,24	0,05	0,04	1,05	0,72	0,26	1,14	+0,3	4,6	0,00	0,51	0,77
8,20 - 8,27	0,95	0,22	0,28	0,04	0,63	0,56	0,27	1,20	+0,1	4,2	0,00	0,53	0,80
8,27 - 8,34	0,90	0,21	0,03	0,04	1,12	0,43	0,28	1,41	+0,2	4,4	0,00	0,68	0,96
8,34 - 8,40	0,83	0,19	0,01	0,00	1,20	0,34	0,24	1,41	+0,3	4,2	0,00	0,68	0,92
8,40 - 8,48	0,69	0,16	0,04	0,01	1,66	0,44	0,26	1,48	+0,4	4,7	0,00	1,03	1,29
8,48 - 8,56	0,65	0,15	0,04	0,03	1,00	0,44	0,23	1,24	-0,1	3,7	0,00	0,84	1,07
8,56 - 8,64	1,43	0,33	0,04	0,04	1,08	0,61	0,26	1,57	+0,5	5,4	0,00	0,34	0,60
8,64 - 8,72	0,84	0,19	0,08	0,03	1,72	0,71	0,19	1,69	+0,3	5,5	0,00	1,32	1,51
8,72 - 8,81	1,00	0,23	0,04	0,03	1,35	0,75	0,24	1,59	+0,1	5,2	0,00	1,05	1,29
8,8 - 8,90	1,00	0,23	0,19	0,10	1,33	0,60	0,24	1,31	+0,6	5,0	0,00	0,62	0,86
8,90 - 8,97	1,22	0,28	0,02	0,05	0,76	0,54	0,37	1,18	+0,2	4,4	0,00	0,15	0,52
8,97 - 9,04	0,33	0,07	0,01	0,01	2,25	0,33	0,19	1,88	+0,3	5,1	0,00	1,78	1,97
9,04 - 9,10	1,13	0,26	0,01	0,04	1,31	0,56	0,28	1,64	+0,3	5,2	0,00	0,74	1,02
9,10 - 9,19	1,36	0,31	0,01	0,04	0,74	0,56	0,31	1,20	+0,4	4,5	0,00	0,01	0,32
9,19 - 9,28	0,75	0,17	0,01	0,04	1,47	0,39	0,21	1,56	+0,3	4,6	0,00	0,98	1,19
9,28 - 9,37	1,26	0,29	0,04	0,04	2,03	0,57	0,22	2,50	+0,4	7,0	0,00	1,44	1,66
9,37 - 9,47	0,92	0,21	0,03	0,01	1,62	0,55	0,21	2,00	0,0	5,6	0,00	1,36	1,57
9,47 - 9,57	0,99	0,23	0,24	0,03	0,76	0,39	0,26	1,32	+0,3	4,2	0,00	0,30	0,56

Tableau A.2.21

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}
2,50 - 2,56	13,8	4,0	2,0	2,5	32,0	14	109	2,3	7,2	-
2,56 - 2,62	21,2	2,9	1,7	2,0	30,0	13	108	1,4	-	4,5
2,62 - 2,67	9,5	6,1	3,0	2,0	32,8	10	58	3,5	15,7	-
2,67 - 2,73	29,5	6,1	6,6	1,4	46,3	12	36	1,6	-	3,7
2,73 - 2,79	11,2	5,0	2,9	2,1	40,0	12	64	3,6	19,8	-
2,79 - 2,85	8,9	6,7	1,7	3,1	33,3	12	96	3,7	17,3	-
2,85 - 2,91	10,9	5,3	2,0	2,2	41,4	15	56	3,8	21,8	-
2,91 - 2,97	4,8	8,0	3,4	2,1	37,8	13	44	7,9	29,2	-
2,97 - 3,03	7,1	10,3	7,3	2,1	28,8	14	59	4,1	16,0	-
3,03 - 3,08	10,3	2,6	1,1	2,0	27,9	15	67	2,7	9,4	-
3,08 - 3,14	7,5	4,2	3,9	2,6	32,4	15	67	4,3	18,9	-
3,14 - 3,20	14,0	12,0	1,7	2,1	41,3	18	68	3,0	16,1	-
3,20 - 3,25	15,1	6,0	3,6	1,6	37,6	16	60	2,5	10,4	-
3,25 - 3,31	13,5	2,8	5,9	2,3	45,0	14	71	3,3	20,7	-
3,31 - 3,37	15,6	6,6	1,4	1,3	24,3	13	49	1,6	-	2,1
3,37 - 3,42	16,5	4,8	3,1	0,7	27,0	12	39	1,6	-	1,5
3,42 - 3,48	16,7	5,2	1,8	1,7	29,2	10	60	1,7	-	0,5
3,48 - 3,54	28,0	7,7	2,0	1,2	48,6	12	61	1,7	-	1,0
3,54 - 3,60	26,3	4,9	3,6	0,9	40,6	14	48	1,54	-	3,7
3,60 - 3,65	23,2	5,7	3,4	1,4	38,7	10	55	1,7	-	1,7
3,65 - 3,70	15,0	2,1	8,1	1,8	43,2	9	63	2,9	16,2	-
3,70 - 3,75	22,6	8,3	4,5	1,9	41,4	12	71	1,8	0,7	-
3,75 - 3,80	11,7	10,5	1,8	1,9	38,7	14	61	3,3	17,6	-
3,80 - 3,85	12,3	5,1	2,7	2,1	36,7	19	60	3,0	14,6	-
3,85 - 3,91	24,0	3,0	2,0	2,2	80,0	25	60	3,3	36,8	-

Tableau A.2.22

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Na ⁺ _{ex.}	Cl ⁻ _{ex.}
3,91 - 3,96	23,7	7,7	1,8	2,3	67,5	19	67	2,8	-	24,8
3,96 - 4,01	26,3	4,7	4,5	2,3	68,4	21	60	2,6	-	21,1
4,01 - 4,07	33,4	12,5	12,4	1,9	60,3	22	67	1,8	-	0,2
4,07 - 4,12	12,2	9,4	1,4	2,3	55,0	19	46	4,5	-	33,1
4,12 - 4,17	36,6	8,5	5,9	1,6	62,0	21	58	1,7	2,1	-
4,17 - 4,23	23,1	12,0	7,2	2,3	56,7	17	80	2,5	-	15,1
4,23 - 4,28	22,8	4,3	3,6	2,5	56,7	18	79	2,5	-	15,7
4,28 - 4,34	24,0	8,2	5,0	2,1	66,6	20	48	2,8	-	23,4
4,34 - 4,39	15,3	9,0	2,7	2,3	48,7	20	60	3,2	-	21,2
4,39 - 4,45	26,0	5,0	1,0	1,9	40,5	20	79	1,6	3,5	-
4,45 - 4,50	28,2	3,8	1,3	1,9	46,9	19	66	1,7	2,1	-
4,50 - 4,56	10,0	9,7	14,0	2,7	44,1	24	65	4,4	-	26,1
4,56 - 4,61	26,0	7,0	4,5	2,2	49,5	28	65	1,9	-	2,7
4,61 - 4,67	32,0	3,8	7,3	1,9	66,6	22	62	2,1	-	9,0
4,67 - 4,72	25,0	5,8	14,6	3,0	55,0	22	109	2,2	-	10,0
4,72 - 4,77	11,5	8,4	7,6	2,5	42,3	22	57	3,7	-	21,6
4,77 - 4,82	12,0	5,7	12,0	2,3	50,0	22	64	4,2	-	28,4
4,82 - 4,85	5,2	4,7	0,5	2,7	48,7	16	38	9,4	-	39,3
4,87 - 4,92	9,1	3,6	1,3	3,2	50,0	18	69	5,5	-	33,6
4,92 - 4,97	11,9	5,4	3,1	2,1	33,3	17	73	2,8	-	11,9
4,97 - 5,03	15,0	12,0	12,0	2,3	46,8	22	80	3,1	-	19,8
5,03 - 5,08	16,8	14,0	4,3	2,0	34,2	15	74	2,0	-	4,0
5,08 - 5,13	28,8	11,0	12,0	2,8	47,7	20	77	1,7	2,3	-
5,13 - 5,18	41,9	12,0	6,7	1,1	57,6	18	56	1,4	9,9	-
5,18 - 5,21	30,4	12,0	10,2	1,4	43,2	20	70	1,4	6,4	-

Tableau A.2.22

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}
5,21 - 5,26	23,2	3,0	2,4	1,2	17,1	17	63	0,7	-	13,7
5,26 - 5,31	22,3	15,0	7,6	1,4	19,8	20	95	0,9	-	11,3
5,31 - 5,36	14,9	2,8	0,9	0,9	17,1	16	56	1,2	-	5,4
5,36 - 5,42	13,4	2,3	1,8	1,6	11,7	16	51	0,9	-	6,9
5,42 - 5,47	23,8	5,8	4,3	1,3	24,3	14	64	1,0	-	10,3
5,47 - 5,52	32,0	5,1	2,3	1,9	27,9	15	80	0,9	-	16,5
5,52 - 5,57	32,0	6,7	2,9	1,2	22,5	15	91	0,7	-	19,5
5,57 - 5,62	17,4	4,5	2,7	1,4	27,9	17	48	1,6	-	1,9
5,62 - 5,67	19,0	5,8	1,8	1,8	20,7	15	75	1,1	-	7,5
5,67 - 5,72	32,1	4,7	4,5	1,3	18,0	16	85	0,6	-	22,1
5,72 - 5,77	26,4	7,3	2,7	1,1	27,0	16	60	1,0	-	11,4
5,77 - 5,83	22,6	6,9	1,8	0,5	13,5	16	55	0,6	-	15,1
5,83 - 5,88	15,2	3,4	1,8	1,4	17,1	16	64	1,1	-	5,7
5,88 - 5,93	15,5	7,9	3,6	2,2	26,0	14	84	1,7	-	1,0
5,93 - 5,98	18,0	4,1	1,8	1,6	27,9	16	58	1,6	-	2,5
5,98 - 6,03	24,4	5,6	5,4	2,8	42,3	15	100	1,7	-	0,9
6,03 - 6,08	29,9	15,0	10,1	3,0	52,2	16	108	1,7	-	0,87
6,08 - 6,13	29,3	8,1	2,4	1,6	29,7	17	81	1,0	-	12,8
6,13 - 6,18	29,7	7,0	2,7	1,3	31,5	19	71	1,1	-	12,2
6,18 - 6,23	29,1	2,1	2,9	1,5	27,0	14	66	0,9	-	14,1
6,23 - 6,29	37,0	8,4	4,5	0,8	24,7	16	64	0,7	-	22,3
6,29 - 6,34	23,7	3,1	0,9	1,4	16,2	14	64	0,7	-	14,7
6,34 - 6,39	15,0	3,2	2,5	1,7	15,3	13	80	1,0	-	6,5
6,39 - 6,44	18,11	3,5	5,9	1,1	24,3	18	47	1,3	-	4,6
5,44 - 6,49	13,6	8,0	0,9	1,3	20,3	12	70	1,5	-	2,31

Tableau A.2.22

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}
6,49 - 6,54	12,1	3,7	1,6	1,8	21,5	15	80	1,8	-	0,2
6,54 - 6,59	8,5	2,3	1,8	2,2	20,0	15	84	2,4	4,7	-
6,59 - 6,64	7,4	1,6	0,5	2,0	20,0	17	52	2,7	6,7	-
6,64 - 6,69	9,1	12,4	5,9	2,3	27,0	18	75	3,0	10,6	-
6,69 - 6,74	12,7	2,5	0,9	1,6	20,0	14	60	1,6	-	1,6
6,74 - 6,79	25,0	14,2	9,0	1,1	43,2	15	60	1,7	-	1,0
6,79 - 6,84	22,8	2,9	1,4	1,2	38,7	16	60	1,7	-	1,3
6,84 - 6,90	25,2	6,5	2,5	3,0	51,0	13	100	2,0	5,6	-
6,90 - 6,95	30,4	9,3	5,4	2,3	60,3	14	79	2,0	5,6	-
6,95 - 7,00	60,0	5,0	9,7	1,5	87,3	22	74	1,5	-	11,46
7,00 - 7,05	13,8	1,6	0,9	2,4	55,8	18	56	4,0	31,0	-
7,05 - 7,10	20,3	6,3	6,7	2,7	64,8	24	70	3,2	28,3	-
7,10 - 7,15	23,0	14,0	6,5	2,9	78,3	25	90	3,4	36,9	-
7,15 - 7,20	7,1	2,7	2,3	4,1	74,7	16	73	10,5	61,9	-
7,20 - 7,25	5,1	2,2	4,7	2,7	58,5	19	38	11,5	49,3	-
7,25 - 7,30	10,9	2,5	5,4	2,4	42,3	16	70	3,9	22,7	-
7,30 - 7,36	22,9	4,2	7,4	2,5	58,5	15	73	2,6	17,3	-
7,36 - 7,41	15,0	10,6	4,3	3,2	32,6	16	97	2,2	5,6	-
7,41 - 7,46	5,0	5,6	2,5	2,3	16,2	11	83	3,2	7,2	-
7,46 - 7,51	25,1	2,4	11,0	2,0	19,8	15	97	0,8	-	14,1
7,51 - 7,56	24,3	2,4	1,4	1,7	19,8	14	88	0,8	-	13,3
7,56 - 7,61	22,5	5,1	3,2	1,6	18,9	15	84	0,8	-	12,0
7,61 - 7,66	23,2	3,4	3,2	1,7	20,7	13	80	0,9	-	11,7
7,66 - 7,71	21,5	1,6	0,9	1,7	18,0	12	84	0,8	-	11,5

Tableau A.2.22

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Cl ⁻ _{ex}	Na ⁺ _{ex}
7,71 - 7,76	18,1	2,3	3,9	2,9	18,9	11	118	1,0	-	7,6
7,76 - 7,82	19,5	3,0	2,5	2,7	14,4	12	110	0,7	-	11,5
7,82 - 7,87	16,1	2,0	0,9	2,9	15,3	13	110	1,0	-	7,6
7,87 - 7,92	20,0	3,1	1,1	3,3	19,8	14	164	1,0	-	8,9
7,92 - 7,97	9,2	2,9	14,0	3,4	13,5	12	119	1,5	-	1,7
7,97 - 8,02	14,8	3,1	2,0	2,1	15,3	14	92	1,0	-	6,3
8,02 - 8,07	20,0	8,1	3,2	1,2	20,7	17	70	1,0	-	8,5
8,07 - 8,12	30,0	2,6	3,8	1,0	20,7	14	82	0,7	-	18,5
8,12 - 8,17	40,0	4,4	2,0	0,9	27,0	14	88	0,7	-	25,0
8,17 - 8,22	37,0	2,3	2,7	0,8	40,0	21	67	1,1	-	14,5
8,22 - 8,27	20,7	3,5	2,7	1,1	19,9	13	59	0,9	-	10,2
8,27 - 8,32	6,2	3,2	0,5	2,0	14,5	8	70	2,3	3,3	-
8,32 - 8,36	24,3	2,8	1,6	1,6	14,9	14	71	0,6	-	16,0
8,36 - 8,41	16,1	2,3	2,0	1,7	18,0	9	67	1,1	-	6,1
8,41 - 8,46	18,2	2,7	3,8	1,3	18,9	10	61	1,0	-	7,7
8,46 - 8,51	20,6	4,3	1,8	1,1	16,0	11	63	0,8	-	11,7
8,51 - 8,56	19,4	5,7	2,3	1,1	17,0	10	55	0,9	-	9,9
8,56 - 8,61	18,3	2,1	2,5	1,4	18,0	9	53	1,0	-	8,3
8,61 - 8,66	46,0	7,5	7,9	0,6	35,0	17	80	0,8	-	26,5
8,66 - 8,71	45,9	12,0	2,5	0,9	40,0	15	78	0,9	-	23,7
8,71 - 8,76	25,4	14,0	3,8	1,0	30,0	10	74	1,2	-	8,7
8,76 - 8,81	28,5	7,2	1,6	1,1	31,2	11	74	1,1	-	11,5
8,81 - 8,85	24,9	3,2	6,8	0,8	42,3	9	53	1,7	-	1,4
8,85 - 8,90	22,0	12,5	5,9	1,3	23,4	10	70	1,1	-	9,0

Tableau A.2.22

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}
8,90 - 8,95	27,9	6,0	4,0	1,4	30,0	9	71	1,1	-	11,2
8,95 - 9,00	31,1	10,0	7,2	1,2	21,5	14	66	0,7	-	19,1
9,00 - 9,05	38,5	7,4	12,0	0,6	30,5	20	60	0,8	-	21,5
9,05 - 9,10	9,5	4,5	0,9	1,7	20,3	10	83	2,1	3,2	-
9,10 - 9,15	26,8	6,0	0,9	1,4	21,0	16	72	0,8	-	16,7
9,15 - 9,20	35,0	12,0	2,0	0,5	25,0	25	53	0,7	-	21,1
9,20 - 9,26	31,3	13,4	2,3	0,7	18,5	16	59	0,6	-	21,0
9,26 - 9,31	12,7	8,1	0,9	1,0	10,0	10	67	0,8	-	7,1
9,31 - 9,36	42,5	5,0	2,5	1,0	19,0	16	115	0,4	-	31,9
9,36 - 9,41	36,7	3,5	3,2	1,8	27,5	14	131	0,7	-	21,4
9,41 - 9,46	30,8	4,8	2,3	2,3	22,5	10	113	0,7	-	18,3
9,46 - 9,51	12,05	5,9	3,6	2,1	25,0	11	92	2,1	3,4	-
9,51 - 9,56	34,0	7,7	4,8	1,2	20,0	19	96	0,6	-	22,8
9,56 - 9,61	12,05	5,8	3,4	1,3	28,8	12	53	2,4	7,1	-
9,61 - 9,66	24,6	10,9	4,0	0,6	23,5	19	64	1,0	-	11,5
9,66 - 9,71	6,3	4,0	3,7	1,5	32,85	11	39	5,2	21,5	-
9,71 - 9,76	25,9	3,9	4,1	1,4	32,8	12	80	1,3	-	7,7
9,76 - 9,81	33,0	10,3	2,7	0,6	19,9	18	71	0,6	-	21,9
9,81 - 9,86	34,3	12,2	14,0	1,1	37,8	22	82	1,1	-	13,3
9,86 - 9,91	24,7	7,2	2,4	0,7	28,3	15	40	1,1	-	8,9
9,91 - 9,96	24,5	4,4	4,1	1,1	38,0	14	46	1,6	-	3,4
9,96 - 10,00	19,8	6,1	5,8	1,5	35,0	12	65	1,8	-	0,3
10,00-10,05	18,9	6,0	5,9	1,3	23,4	12	64	1,2	-	5,9
10,05-10,10	33,3	14,5	3,2	1,0	31,0	16	70	0,9	-	16,1
10,10-10,15	39,7	6,6	9,0	0,4	34,4	28	53	0,9	-	20,6

Tableau A.2.22

Tableau A.2.23

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	ΔC	Σ	Na ⁺ ex.	Cl ⁻ ex.	SO ₄ ^{--★} ex.	H ⁺ calculée
2,50 - 2,56	0,60	0,14	0,22	0,05	2,51	0,90	0,23	2,27	+0,1	6,9	-	0,20	2,20	2,63
2,56 - 2,62	0,92	0,21	0,16	0,04	1,99	0,85	0,21	2,26	0,0	6,6	0,19	-	1,92	2,13
2,62 - 2,67	0,41	0,10	0,34	0,08	2,02	0,92	0,17	1,21	+0,7	5,3	-	0,44	1,16	1,77
2,67 - 2,73	1,28	0,30	0,34	0,17	1,44	1,30	0,19	0,76	+1,3	5,8	0,17	-	0,41	0,60
2,73 - 2,79	0,49	0,11	0,28	0,07	2,14	1,13	0,20	1,33	+0,4	5,8	-	0,56	1,27	2,03
2,79 - 2,85	0,39	0,09	0,37	0,04	3,08	0,94	0,19	2,00	+0,8	7,1	-	0,48	1,95	2,62
2,85 - 2,91	0,47	0,11	0,29	0,05	2,20	1,17	0,24	1,17	+0,5	5,7	-	0,62	1,11	1,97
2,91 - 2,97	0,21	0,05	0,44	0,09	2,08	1,06	0,21	0,92	+0,7	5,1	-	0,82	0,89	1,92
2,97 - 3,03	0,31	0,07	0,57	0,19	2,06	0,81	0,23	1,23	+0,9	5,5	-	0,45	1,19	1,87
3,03 - 3,08	0,45	0,10	0,14	0,03	1,98	0,78	0,24	1,44	+0,2	5,2	-	0,26	1,39	1,89
3,08 - 3,14	0,33	0,08	0,23	0,10	2,59	0,91	0,25	1,40	+0,8	5,9	-	0,53	1,36	2,14
3,14 - 3,20	0,61	0,14	0,67	0,04	2,08	1,16	0,28	1,42	+0,7	6,4	-	0,45	1,35	2,08
3,20 - 3,25	0,66	0,15	0,33	0,09	1,63	1,06	0,26	1,25	+0,3	5,4	-	0,29	1,17	1,72
3,25 - 3,31	0,59	0,14	0,16	0,15	2,32	1,27	0,23	1,48	+0,4	6,3	-	0,58	1,41	2,22
3,31 - 3,37	0,68	0,16	0,37	0,04	1,29	0,68	0,21	1,02	+0,6	4,5	0,10	-	0,82	1,03
3,37 - 3,42	0,72	0,16	0,27	0,08	0,74	0,76	0,19	0,81	+0,2	3,7	0,07	-	0,64	0,83
3,42 - 3,48	0,73	0,17	0,29	0,05	1,71	0,82	0,16	1,25	+0,7	5,2	0,03	-	1,13	1,29
3,48 - 3,54	1,22	0,28	0,43	0,05	1,23	1,37	0,19	1,27	+0,4	6,0	0,05	-	1,07	1,26
3,54 - 3,60	1,14	0,26	0,27	0,09	0,92	1,14	0,23	1,00	+0,3	5,0	0,15	-	0,67	0,90
3,60 - 3,65	1,01	0,23	0,32	0,09	1,35	1,09	0,16	1,15	+0,6	5,4	0,08	-	0,94	1,10
3,65 - 3,70	0,65	0,15	0,12	0,21	1,84	1,22	0,15	1,31	+0,3	5,7	-	0,46	1,23	1,84
3,70 - 3,75	0,98	0,23	0,46	0,12	1,86	1,17	0,19	1,48	+0,8	6,5	-	0,03	1,36	1,58
3,75 - 3,80	0,51	0,13	0,58	0,05	1,94	1,09	0,22	1,27	+0,6	5,8	-	0,50	1,20	1,93
3,80 - 3,85	0,53	0,12	0,28	0,07	2,06	1,03	0,30	1,26	+0,5	5,7	-	0,41	1,20	1,91
3,85 - 3,91	1,04	0,24	0,17	0,05	2,16	2,25	0,40	1,25	-0,3	7,6	-	1,04	1,12	2,56

Tableau A.2.23

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Σ	Na ⁺ ex.	Cl ⁻ ex.	SO ₄ ^{--★} ex.	H ⁺ calculée
3,91 - 3,96	1,03	0,24	0,43	0,05	2,31	1,90	0,30	1,40	+0,5	7,7	-	0,70	1,27	2,28
3,96 - 4,01	1,14	0,26	0,26	0,12	2,29	1,93	0,34	1,24	+0,6	7,6	-	0,60	1,10	2,04
4,01 - 4,07	1,45	0,33	0,69	0,32	1,93	1,70	0,36	1,40	+1,3	8,2	-	0,01	1,22	1,59
4,07 - 4,12	0,53	0,12	0,52	0,04	2,28	1,55	0,31	0,96	+0,7	6,3	-	0,94	0,89	2,15
4,12 - 4,17	1,59	0,37	0,47	0,15	1,59	1,75	0,34	1,21	+0,9	7,5	0,09	-	0,91	1,25
4,17 - 4,23	1,00	0,23	0,67	0,19	2,32	1,60	0,28	1,68	+0,9	8,0	-	0,43	1,56	2,27
4,23 - 4,28	0,99	0,23	0,24	0,09	2,53	1,60	0,29	1,65	+0,5	7,6	-	0,45	1,53	2,27
4,28 - 4,34	1,04	0,24	0,46	0,13	2,10	1,88	0,31	1,00	+0,8	7,2	-	0,67	0,87	1,85
4,34 - 4,39	0,67	0,15	0,50	0,07	2,31	1,37	0,31	1,25	+0,8	6,6	-	0,59	1,17	2,07
4,39 - 4,45	1,13	0,26	0,28	0,03	1,92	1,14	0,32	1,65	+0,5	6,7	0,15	-	1,33	1,65
4,45 - 4,50	1,23	0,28	0,21	0,03	1,90	1,32	0,30	1,38	+0,7	6,7	0,10	-	1,11	1,41
4,50 - 4,56	0,43	0,10	0,54	0,36	2,71	1,24	0,39	1,36	+1,2	7,1	-	0,74	1,31	2,44
4,56 - 4,61	1,13	0,26	0,39	0,12	2,18	1,39	0,44	1,35	+0,9	7,3	-	0,07	1,21	1,72
4,61 - 4,67	1,39	0,32	0,21	0,19	1,90	1,88	0,35	1,29	+0,5	7,5	-	0,26	1,12	1,73
4,67 - 4,72	1,09	0,25	0,32	0,37	3,00	1,55	0,35	2,27	+0,9	9,2	-	0,28	2,14	2,77
4,72 - 4,77	0,50	0,12	0,47	0,19	2,47	1,19	0,35	1,18	+1,0	6,5	-	0,61	1,12	2,08
4,77 - 4,82	0,52	0,12	0,32	0,31	2,30	1,41	0,35	1,33	+0,5	6,7	-	0,80	1,27	2,42
4,82 - 4,87	0,23	0,05	0,26	0,01	2,71	1,37	0,26	0,79	+0,8	5,7	-	1,10	0,76	2,12
4,87 - 4,92	0,40	0,09	0,20	0,03	3,18	1,41	0,29	1,44	+0,8	7,0	-	0,94	1,39	2,62
4,92 - 4,97	0,52	0,12	0,30	0,08	2,10	0,94	0,27	1,52	+0,4	5,9	-	0,33	1,46	2,06
4,97 - 5,03	0,65	0,15	0,67	0,31	2,28	1,32	0,35	1,67	+0,7	7,4	-	0,56	1,59	2,50
5,03 - 5,08	0,73	0,17	0,78	0,11	1,98	0,96	0,24	1,54	+1,0	6,5	-	0,11	1,45	1,80
5,08 - 5,13	1,25	0,29	0,61	0,31	2,80	1,34	0,32	1,61	+2,0	8,5	0,10	-	1,34	1,66
5,13 - 5,18	1,82	0,42	0,67	0,17	1,10	1,62	0,29	1,17	+1,1	7,3	0,43	-	0,44	0,73
5,18 - 5,21	1,32	0,30	0,67	0,26	1,37	1,22	0,31	1,46	+0,9	6,9	0,27	-	0,98	1,29

Tableau A.2.23

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Σ	Na ⁺ _{ex.}	SO ₄ ^{--★} _{ex.}	H ⁺
5,21 - 5,26	1,01	0,23	0,17	0,06	1,20	0,48	0,27	1,31	+0,6	4,7	0,60	0,49	0,76
5,26 - 5,31	0,97	0,22	0,83	0,19	1,35	0,56	0,32	1,98	+0,7	6,4	0,49	1,29	1,61
6,31 - 5,36	0,65	0,15	0,16	0,02	0,92	0,48	0,26	1,17	0,0	3,8	0,24	0,81	1,07
5,36 - 5,42	0,58	0,13	0,13	0,05	1,59	0,33	0,26	1,06	+0,8	4,1	0,30	0,64	0,90
5,42 - 5,47	1,03	0,24	0,32	0,11	1,25	0,68	0,23	1,33	+0,7	5,2	0,45	0,68	0,91
5,47 - 5,52	1,39	0,32	0,28	0,06	1,86	0,79	0,24	1,67	+1,2	6,6	0,71	0,67	0,91
5,52 - 5,57	1,39	0,32	0,37	0,07	1,17	0,63	0,24	1,90	+ 0,6	6,1	0,85	0,74	0,98
5,57 - 5,62	0,76	0,17	0,25	0,07	1,40	0,79	0,27	1,00	+0,6	4,7	0,08	0,81	1,08
5,62 - 5,67	0,83	0,19	0,32	0,05	1,83	0,58	0,24	1,56	+0,8	5,6	0,33	1,07	1,31
5,67 - 5,72	1,40	0,32	0,26	0,12	1,31	0,51	0,26	1,77	+0,9	6,0	0,96	0,47	0,73
5,72 - 5,77	1,15	0,26	0,41	0,07	1,12	0,76	0,26	1,25	+0,7	5,3	0,50	0,53	0,79
5,77 - 5,83	0,98	0,23	0,38	0,05	0,54	0,38	0,26	1,15	+0,4	4,0	0,65	0,27	0,53
5,83 - 5,88	0,66	0,15	0,19	0,05	1,41	0,48	0,26	1,33	+0,4	4,5	0,25	0,96	1,22
5,88 - 5,93	0,67	0,16	0,44	0,09	2,23	0,73	0,23	1,75	+0,9	6,3	0,04	1,62	1,85
5,93 - 5,98	0,78	0,18	0,23	0,05	1,59	0,79	0,26	1,21	+0,6	5,1	0,10	0,99	1,25
5,98 - 6,03	1,06	0,24	0,31	0,14	2,82	1,19	0,24	2,08	1,1	8,1	0,04	1,90	2,14
6,03 - 6,08	1,3	0,30	0,83	0,26	2,99	1,47	0,26	2,25	+1,7	9,7	0,04	2,04	2,30
6,08 - 6,13	1,27	0,29	0,45	0,06	1,63	0,84	0,27	1,69	+0,9	6,5	0,55	0,89	1,16
6,13 - 6,18	1,29	0,30	0,39	0,07	1,34	0,89	0,31	1,48	+0,7	6,1	0,53	0,71	1,02
6,18 - 6,23	1,27	0,29	0,12	0,07	1,46	0,76	0,23	1,38	+0,8	5,6	0,62	0,50	0,73
6,23 - 6,29	1,61	0,37	0,47	0,12	0,79	0,70	0,26	1,33	+1,1	5,7	1,00	0,00	0,26
6,29 - 6,34	1,03	0,24	0,17	0,02	1,35	0,46	0,23	1,33	+0,8	4,8	0,64	0,46	0,69
6,34 - 6,39	0,65	0,15	0,18	0,06	1,71	0,43	0,21	1,66	+0,5	5,1	0,28	1,25	1,46
6,39 - 6,44	0,79	0,18	0,19	0,15	1,07	0,68	0,29	0,98	+0,4	4,3	0,20	0,64	0,93
6,44 - 6,49	0,59	0,14	0,44	0,02	1,31	0,57	0,19	1,46	+0,3	4,7	0,10	1,27	1,46

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Σ	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}	SO ₄ ^{--★} _{ex.}	H ⁺ calculée
6,49 - 6,54	0,53	0,12	0,21	0,04	1,84	0,61	0,24	1,67	+0,2	5,3	0,00	0,00	1,61	1,85
6,54 - 6,59	0,37	0,09	0,13	0,05	2,16	0,56	0,24	1,75	+0,3	5,4	0,13	-	1,71	2,07
6,59 - 6,64	0,32	0,07	0,09	0,01	1,98	0,56	0,27	1,08	+0,6	4,4	0,19	-	1,04	1,50
6,64 - 6,69	0,40	0,09	0,69	0,15	2,32	0,76	0,29	1,56	+1,0	6,3	0,29	-	1,51	2,09
6,69 - 6,74	0,55	0,13	0,14	0,02	1,56	0,56	0,23	1,25	+0,4	4,4	-	0,07	1,10	1,33
6,74 - 6,79	1,09	0,25	0,79	0,23	1,05	1,22	0,24	1,25	+0,7	6,1	-	0,04	1,06	1,30
6,79 - 6,84	0,99	0,33	0,16	0,04	1,22	1,09	0,26	1,25	0,0	5,2	-	0,06	1,06	1,32
6,84 - 6,90	1,10	0,25	0,36	0,06	3,05	1,44	0,21	2,08	+1,1	8,6	0,16	-	1,95	2,32
6,90 - 6,95	1,32	0,30	0,52	0,14	2,28	1,70	0,23	1,65	+1,0	8,1	0,16	-	1,49	1,88
6,95 - 7,00	2,60	0,60	0,28	0,25	1,51	2,46	0,35	1,54	+0,9	9,6	-	0,50	P,65	1,00
7,00 - 7,05	0,60	0,14	0,09	0,02	2,39	1,57	0,29	1,17	+0,2	6,3	0,87	-	1,10	2,26
7,05 - 7,10	0,88	0,20	0,35	0,17	2,71	1,83	0,39	1,46	+0,6	8,0	0,80	-	1,35	2,54
7,10 - 7,15	1,00	0,23	0,78	0,17	2,87	2,21	0,40	1,88	+0,6	9,5	1,04	-	1,76	3,19
7,15 - 7,20	0,31	0,07	0,15	0,06	4,07	2,10	0,26	1,52	+0,8	8,5	1,74	-	1,48	3,26
7,20 - 7,25	0,22	0,05	0,12	0,12	2,70	1,65	0,31	0,79	+0,5	6,0	1,39	-	0,76	2,46
7,25 - 7,30	0,47	0,11	0,14	0,14	2,39	1,19	0,26	1,46	+0,3	6,2	0,64	-	1,40	2,30
7,30 - 7,36	1,00	0,23	0,23	0,19	2,46	1,65	0,24	1,52	+0,7	7,5	0,48	-	1,40	2,12
7,36 - 7,41	0,65	0,15	0,59	0,11	3,22	0,92	0,26	2,02	+1,5	7,9	0,16	-	1,94	2,36
7,41 - 7,46	0,22	0,05	0,31	0,06	2,37	0,46	0,18	1,73	+0,5	5,3	0,20	-	1,70	2,08
7,46 - 7,51	1,09	0,25	0,13	0,28	1,99	0,56	0,24	2,02	+0,9	6,6	-	0,61	1,17	1,41
7,51 - 7,56	1,06	0,24	0,13	0,04	1,74	0,56	0,23	1,83	+0,6	5,8	-	0,58	1,02	1,25
7,56 - 7,61	0,98	0,23	0,28	0,08	1,56	0,53	0,24	1,75	+0,6	5,6	-	0,52	1,02	1,26
7,61 - 7,66	1,01	0,23	0,19	0,08	1,66	0,58	0,21	1,67	+0,7	5,6	-	0,51	0,95	1,16
7,66 - 7,71	0,93	0,22	0,09	0,02	1,72	0,51	0,19	1,75	+0,5	5,4	-	0,49	1,06	1,25

Tableau A.2.23

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	ΔC	Σ	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}	SO ₄ ^{--★} _{ex.}	H ⁺
7,71 - 7,76	0,79	0,18	0,13	0,10	2,86	0,53	0,18	2,46	+0,9	7,2	-	0,34	1,97	2,15
7,76 - 7,82	0,85	0,20	0,17	0,06	2,71	0,41	0,19	2,29	+1,1	6,9	-	0,50	1,60	1,79
7,82 - 7,87	0,70	0,16	0,11	0,02	2,86	0,43	0,21	2,29	+0,9	6,8	-	0,33	1,82	2,03
7,87 - 7,92	0,87	0,20	0,17	0,03	3,25	0,56	0,23	3,42	+0,3	8,7	-	0,40	2,86	3,10
7,92 - 7,97	0,40	0,09	0,16	0,36	3,39	0,38	0,19	2,48	+1,4	7,5	-	0,07	2,34	2,53
7,07 - 8,02	0,64	0,15	0,17	0,05	2,11	0,43	0,23	1,92	+0,5	5,7	-	0,27	1,52	1,75
8,02 - 8,07	0,86	0,20	0,45	0,08	1,17	0,58	0,27	1,46	+0,5	5,1	-	0,36	0,93	1,20
8,07 - 8,12	1,30	0,30	0,14	0,10	1,02	0,58	0,23	1,71	+0,3	5,4	-	0,81	0,61	0,84
8,12 - 8,17	1,74	0,40	0,24	0,05	0,94	0,76	0,23	1,83	+0,6	6,2	-	1,09	0,35	0,58
8,17 - 8,22	1,61	0,37	0,13	0,07	0,80	1,13	0,34	1,40	+0,1	5,9	-	0,64	0,45	0,79
8,22 - 8,27	0,9	0,21	0,19	0,07	1,12	0,53	0,21	1,23	+0,5	4,5	-	0,45	0,60	0,81
8,27 - 8,32	0,27	0,06	0,18	0,01	1,99	0,41	0,13	1,46	+0,5	4,5	0,9	-	1,43	1,56
8,32 - 8,36	1,06	0,24	0,16	0,04	1,55	0,42	0,23	1,48	+0,9	5,2	-	0,70	0,53	0,76
8,36 - 8,41	0,70	0,16	0,13	0,05	1,74	0,51	0,15	1,58	+0,5	5,0	-	0,26	1,19	1,34
8,41 - 8,46	0,79	0,18	0,15	0,10	1,27	0,53	0,16	1,27	+0,5	4,5	-	0,33	0,78	0,94
8,46 - 8,51	0,90	0,21	0,24	0,05	1,05	0,45	0,18	1,31	+0,5	4,4	-	0,51	0,60	0,78
8,51 - 8,56	0,84	0,19	0,32	0,06	1,05	0,48	0,16	1,15	+0,7	4,3	-	0,43	0,55	0,71
8,56 - 8,61	0,80	0,18	0,12	0,06	1,35	0,51	0,15	1,10	+0,8	4,3	-	0,36	0,58	0,73
8,61 - 8,66	2,00	0,46	0,42	0,20	0,64	0,99	0,27	1,67	+0,8	6,7	-	1,15	0,08	0,35
8,66 - 8,71	2,00	0,46	0,67	0,06	0,94	1,13	0,24	1,63	+1,1	7,1	-	1,03	0,18	0,42
8,71 - 8,76	1,10	0,25	0,78	0,10	0,96	0,85	0,16	1,54	+0,6	5,7	-	0,38	0,97	1,13
8,76 - 8,81	1,24	0,29	0,40	0,04	1,05	0,88	0,18	1,54	+0,4	5,6	-	0,48	0,82	1,00
8,81 - 8,85	1,08	0,25	0,18	0,17	0,81	1,19	0,14	1,08	+0,1	4,9	-	0,06	0,88	1,02
8,85 - 8,90	0,96	0,22	0,69	0,15	1,25	0,66	0,16	1,46	+1,0	5,6	-	0,39	0,88	1,04

Tableau A.2.23

Tableau A.2.23

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	ΔC	Σ	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}	SO ₄ ^{--★} _{ex.}	H ⁺
8,90 - 8,95	1,21	0,28	0,33	0,10	1,40	0,85	0,15	1,48	+0,8	5,8	-	0,48	0,77	0,92
8,95 - 9,00	1,35	0,31	0,56	0,18	1,23	0,61	0,23	1,38	+1,4	5,8	-	0,83	0,25	0,48
9,00 - 9,05	1,67	0,39	0,41	0,31	0,64	0,86	0,32	1,25	+1,0	5,9	-	0,93	0,00	0,32
9,05 - 9,10	0,41	0,10	0,25	0,02	1,70	0,57	0,16	1,73	0,0	4,9	0,09	-	1,68	1,93
9,10 - 9,15	1,17	0,27	0,33	0,02	1,40	0,59	0,26	1,50	+0,8	5,5	-	0,66	0,58	0,84
9,15 - 9,20	1,52	0,35	0,67	0,05	0,47	0,70	0,40	1,10	+0,9	5,3	-	0,92	0,00	0,40
9,20 - 9,26	1,36	0,31	0,74	0,06	0,74	0,52	0,26	1,23	+1,2	5,2	-	0,91	0,00	0,26
9,26 - 9,31	0,55	0,13	0,45	0,02	1,00	0,28	0,16	1,40	+0,3	4,0	-	0,31	0,97	1,13
9,31 - 9,36	1,85	0,43	0,28	0,06	1,05	0,54	0,26	2,40	+0,5	6,9	-	1,39	0,55	0,81
9,36 - 9,41	1,59	0,37	0,19	0,08	1,82	0,77	0,23	2,73	+0,3	7,8	-	0,93	1,45	1,68
9,41 - 9,46	1,34	0,31	0,27	0,06	2,32	0,63	0,16	2,35	+1,2	7,4	-	0,80	1,25	1,41
9,46 - 9,51	0,52	0,12	0,33	0,09	2,12	0,70	0,18	1,92	+0,4	6,0	0,09	-	1,86	2,13
9,51 - 9,56	1,48	0,34	0,43	0,12	1,17	0,56	0,31	2,00	+0,7	6,4	-	0,99	0,65	0,96
9,56 - 9,61	0,52	0,12	0,32	0,09	1,26	0,81	0,19	1,10	+0,2	4,4	0,20	-	1,04	1,43
9,61 - 9,66	1,07	0,25	0,61	0,10	0,56	0,66	0,31	1,33	+0,3	4,9	-	0,50	0,61	0,92
9,66 - 9,71	0,27	0,06	0,22	0,09	1,50	0,93	0,18	0,81	+0,2	4,1	0,62	-	0,78	1,58
9,71 - 9,76	1,13	0,26	0,22	0,11	1,44	0,92	0,19	1,67	+0,4	5,9	-	0,34	1,13	1,32
9,76 - 9,81	1,43	0,33	0,57	0,07	0,63	0,56	0,29	1,48	+0,7	5,4	-	0,95	0,20	0,49
9,81 - 9,86	1,49	0,34	0,68	0,36	1,10	1,06	0,35	1,71	+0,9	7,1	-	0,58	0,85	1,20
9,86 - 9,91	1,07	0,25	0,40	0,06	0,68	0,80	0,24	0,83	+0,6	4,3	-	0,38	0,25	0,49
9,91 - 9,96	1,07	0,24	0,24	0,11	1,05	1,07	0,23	0,96	+0,5	5,0	-	0,15	0,65	0,88
9,96 - 10,00	0,86	0,20	0,34	0,15	1,49	1,00	0,19	1,35	+0,5	5,6	0,00	0,00	1,25	1,44
10,00 - 10,05	0,82	0,19	0,33	0,15	1,34	0,66	0,19	1,33	+0,7	5,0	-	0,25	0,93	1,12
10,05 - 10,10	1,45	0,33	0,81	0,08	0,98	0,87	0,26	1,46	+1,1	6,2	-	0,70	0,46	0,72
10,10 - 10,15	1,73	0,40	0,37	0,23	0,40	0,97	0,26	1,10	+0,8	5,5	-	0,90	0,00	0,26

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Na ⁺ _{ex.}
9,88 - 9,96	22,9	5,0	3,0	1,2	11,0	12	76	0,5	17,0
9,96 - 10,03	24,4	3,5	2,5	1,2	17,5	13	97	0,7	14,7
10,03 - 10,10	21,5	2,2	3,0	0,9	16,5	15	76	0,8	12,3
10,10 - 10,18	19,1	0,9	1,8	1,6	15,0	13	86	0,8	10,8
10,18 - 10,25	30,4	1,0	2,2	2,5	15,0	11	172	0,5	22,1
10,25 - 10,36	20,1	2,7	1,8	1,0	12,0	15	59	0,6	13,4
10,35 - 10,44	23,4	2,0	4,0	0,9	11,0	14	61	0,5	17,3
10,44 - 10,52	19,5	2,5	2,8	1,6	10,8	13	103	0,6	13,5
10,52 - 10,60	8,9	1,0	1,0	2,8	11,5	11	127	1,3	2,5
10,60 - 10,68	21,5	1,2	2,0	1,4	16,5	16	77	0,8	12,3
10,68 - 10,76	25,0	2,8	2,0	0,9	17,0	15	61	0,7	15,5
10,76 - 10,83	32,0	4,0	3,0	0,7	14,0	15	84	0,4	24,3
10,83 - 10,90	27,0	5,0	2,5	1,2	15,0	16	80	0,6	18,7
10,90 - 10,98	13,8	3,0	3,0	1,3	15,0	12	80	1,1	5,5
10,98 - 11,07	20,0	3,5	4,2	1,0	13,0	14	65	0,7	12,8
11,07 - 11,15	22,0	4,4	3,2	0,9	19,0	15	67	0,9	11,4

Tableau A.2.24

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}
9,98 - 10,07	20,0	1,0	0,8	1,1	12,5	14	68	0,6	-	13,1
10,07 - 10,15	15,9	0,7	0,5	1,8	12,0	17	68	0,8	-	9,2
10,15 - 10,23	15,1	0,7	1,0	2,1	14,5	16	90	1,0	-	7,0
10,23 - 10,31	22,0	0,9	0,6	2,6	12,5	12	170	0,6	-	15,0
10,31 - 10,40	20,7	0,7	0,6	2,3	10,0	18	126	0,5	-	15,1
10,40 - 10,48	2,25	0,8	0,4	2,0	8,0	18	83	3,6	3,9	-
10,48 - 10,58	15,6	1,4	1,0	2,4	8,5	20	110	0,5	-	10,9
10,58 - 10,68	20,8	1,2	0,8	3,2	10,0	17	160	0,5	-	15,2
10,68 - 10,79	19,0	1,1	1,0	0,9	13,0	19	69	0,7	-	11,8
10,79 - 10,89	30,7	1,8	2,0	0,9	13,0	13	81	0,4	-	23,5
10,89 - 10,96	16,6	3,0	1,8	2,0	12,0	10	106	0,7	-	9,9
10,96 - 11,02	20,3	3,5	2,4	1,6	14,0	13	80	0,7	-	12,5
11,02 - 11,09	22,0	0,8	1,4	1,2	15,0	14	72	0,7	-	13,7
11,09 - 11,15	7,9	0,9	0,4	1,4	9,5	15	56	1,2	-	2,6
11,15 - 11,23	22,2	1,7	1,6	1,1	10,0	17	67	0,5	-	16,6
11,23 - 11,31	21,5	1,4	1,0	1,9	14,0	14	102	0,7	-	13,7
11,31 - 11,39	35,8	1,2	1,4	1,0	20,0	15	97	0,6	-	24,7
11,39 - 11,45	33,2	1,2	1,3	1,7	16,5	16	95	0,5	-	24,0
11,45 - 11,51	24,0	1,3	1,2	2,6	14,0	13	130	0,6	-	16,0
11,51 - 11,58	39,0	2,6	1,8	3,1	16,8	13	215	0,4	-	29,7

Tableau A.2.24

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Na ⁺ _{ex.}
11,15 - 11,22	22,0	2,6	3,7	1,1	12,5	9	80	0,6	15,0
11,22 - 11,28	33,1	1,4	3,8	1,1	12,5	14	87	0,4	26,2
11,28 - 11,35	37,0	1,2	2,9	0,9	17,5	17	84	0,5	27,3
11,35 - 11,41	29,5	1,4	1,8	1,5	21,5	16	86	0,7	17,5
11,41 - 11,48	24,5	5,0	4,0	1,7	27,0	18	92	1,1	9,5
11,48 - 11,58	39,3	18,0	12,0	6,2	22,5	8	342	0,6	26,8
11,58 - 11,67	22,9	3,0	2,9	1,6	13,8	19	87	0,6	15,2
11,67 - 11,74	26,6	2,1	3,7	0,7	10,2	16	68	0,4	20,9
11,74 - 11,81	25,3	2,2	5,0	0,8	10,2	20	65	0,4	19,6
11,81 - 11,88	28,0	1,7	3,9	1,2	12,0	20	110	0,4	21,3
11,88 - 11,95	21,7	1,2	2,0	3,9	10,8	20	224	0,5	15,7
11,95 - 12,02	16,5	2,6	2,3	6,2	11,0	10	342	0,7	10,4
12,02 - 12,07	32,7	2,0	5,5	2,0	13,0	18	140	0,4	25,5
12,07 - 12,13	29,1	2,1	2,8	0,8	12,0	25	61	0,4	22,4
12,13 - 12,19	20,1	1,3	3,9	1,0	9,5	20	77	0,5	14,8
12,19 - 12,24	29,1	2,5	3,9	0,8	10,5	18	83	0,4	23,3

Tableau A.2.24

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}
12,24 - 12,31	27,2	5,0	6,0	0,9	12,0	18	90	0,4	-	20,5
12,31 - 12,38	34,1	4,0	5,8	0,7	13,5	19	84	0,4	-	26,6
12,38 - 12,44	29,3	2,6	4,9	1,2	10,2	14	102	0,3	-	23,6
12,44 - 12,51	31,3	2,2	3,2	1,0	14,6	18	87	0,5	-	23,2
12,51 - 12,58	20,0	1,6	2,0	1,3	12,8	14	77	0,6	-	12,9
12,58 - 12,65	12,4	1,0	3,3	1,5	14,0	15	85	1,1	-	4,6
12,65 - 12,71	23,4	2,1	5,0	1,3	12,8	14	80	0,5	-	16,3
12,71 - 12,77	24,0	2,0	4,7	1,4	20,0	14	86	0,8	-	12,9
12,77 - 12,83	42,0	1,5	4,9	0,8	34,0	16	70	0,8	-	23,1
12,83 - 12,89	32,3	0,8	5,8	1,6	30,4	13	103	0,9	-	15,4
12,89 - 12,96	23,0	2,6	4,6	1,2	26,3	12	85	1,1	-	8,4
12,96 - 13,02	35,1	3,2	3,9	1,4	32,6	16	80	0,9	-	17,0
13,02 - 13,08	31,0	3,2	3,0	0,8	30,8	16	64	1,0	-	13,9
13,08 - 13,17	32,5	5,0	5,0	0,6	41,0	11	51	1,3	-	9,7
13,17 - 13,22	42,2	4,6	5,0	0,8	38,2	17	75	0,9	-	21,0
13,22 - 13,27	64,0	2,7	5,8	0,7	44,2	19	95	0,7	-	39,4
13,27 - 13,33	44,0	1,0	5,0	0,6	26,0	15	81	0,6	-	29,5
13,33 - 13,38	9,6	1,8	5,0	0,9	15,5	15	39	1,6	-	1,0
13,38 - 13,43	25,6	1,9	3,5	0,4	13,5	17	60	0,5	-	18,1
13,43 - 13,50	25,9	1,5	5,3	0,8	12,0	19	67	0,5	-	19,2
13,50 - 13,56	23,4	2,0	3,0	0,9	13,0	15	74	0,6	-	16,2
13,56 - 13,63	24,6	1,5	3,3	1,3	14,0	15	78	0,6	-	16,8
13,63 - 13,69	21,8	1,8	2,2	0,6	9,8	17	45	0,4	-	16,4
13,69 - 13,77	26,5	3,0	5,0	0,8	9,3	15	63	0,4	-	21,3

Tableau A.2.24

Profondeur (m)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}
14,37 - 14,43	20,4	2,0	2,0	1,1	11,7	11	68	0,6	-	13,9
14,43 - 14,50	25,1	1,5	0,75	1,1	13,3	13	71	0,5	-	17,7
14,50 - 14,56	18,3	1,0	1,2	1,2	10,0	13	73	0,6	-	12,7
14,56 - 14,62	16,8	0,5	0,8	1,4	12,5	13	68	0,7	-	9,9
14,62 - 14,68	13,3	0,5	0,8	1,1	11,0	13	53	0,8	-	7,2
14,68 - 14,76	13,7	1,0	0,3	1,4	11,3	11	65	0,8	-	7,4
14,76 - 14,82	24,3	1,5	0,8	1,2	12,1	11	73	0,5	-	17,6
14,82 - 14,89	29,5	0,5	1,5	0,7	13,3	19	45	0,5	-	22,1
14,89 - 14,97	13,8	2,0	1,2	1,3	11,7	10	71	0,8	-	7,3
14,97 - 15,05	18,5	1,1	1,3	1,7	9,4	9	96	0,5	-	13,3
15,05 - 15,13	36,0	1,5	1,9	0,9	10,6	16	95	0,3	-	30,1
15,13 - 15,19	35,5	0,3	1,8	0,8	9,0	14	104	0,3	-	30,5
15,19 - 15,25	33,0	0,8	1,7	0,8	8,4	14	84	0,3	-	28,3
15,25 - 15,30	40,0	1,8	1,8	0,9	9,6	14	123	0,2	-	34,7
15,30 - 15,36	26,8	1,5	1,5	1,7	8,6	13	121	0,3	-	22,0
15,36 - 15,42	20,4	1,5	1,2	1,7	7,6	14	87	0,4	-	16,2
15,42 - 15,47	19,2	1,0	1,2	1,4	9,2	17	80	0,5	-	14,1
15,47 - 15,54	30,0	1,8	1,8	0,9	10,0	20	77	0,3	-	24,4
15,54 - 15,60	8,2	2,5	0,9	1,6	9,2	14	55	1,1	-	3,1
15,60 - 15,66	20,6	2,5	1,0	1,2	10,0	15	60	0,5	-	15,0

Tableau A.2.24

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	ΔC	Σ	Na ⁺ _{ex.}	SO ₄ ^{--★} _{ex.}	H ⁺ _{calculée}
9,88 - 9,96	1,00	0,23	0,28	0,08	1,20	0,31	0,19	1,58	+0,7	4,9	0,73	0,60	0,79
9,96 - 10,03	1,06	0,24	0,19	0,06	1,23	0,49	0,21	2,02	+0,1	5,5	0,64	1,14	1,35
10,03 - 10,10	0,93	0,21	0,12	0,08	0,91	0,46	0,24	1,58	+0,0	4,5	0,53	0,84	1,08
10,10 - 10,18	0,84	0,19	0,05	0,05	1,55	0,42	0,20	1,80	+0,2	5,1	0,48	1,14	1,34
10,18 - 10,25	1,32	0,30	0,06	0,06	2,45	0,42	0,18	3,58	0,0	8,4	0,96	2,30	2,48
10,25 - 10,36	0,87	0,20	0,15	0,05	0,98	0,34	0,25	1,23	+0,4	4,1	0,58	0,45	0,70
10,36 - 10,44	1,02	0,23	0,11	0,10	0,87	0,31	0,22	1,27	+0,5	4,1	0,75	0,26	0,48
10,44 - 10,52	0,85	0,20	0,14	0,07	1,59	0,30	0,22	2,15	+0,2	5,5	0,59	1,35	1,57
10,52 - 10,60	0,39	0,09	0,06	0,03	2,84	0,32	0,18	2,65	+0,3	6,6	0,11	2,47	2,65
10,60 - 10,68	0,93	0,21	0,07	0,05	1,40	0,46	0,26	1,60	+0,3	5,0	0,54	0,86	1,12
10,68 - 10,76	1,09	0,25	0,16	0,05	0,88	0,48	0,24	1,27	+0,4	4,4	0,67	0,34	0,58
10,76 - 10,83	1,39	0,32	0,22	0,08	0,68	0,39	0,24	1,75	+0,3	5,1	1,06	0,35	0,59
10,83 - 10,90	1,17	0,27	0,28	0,06	1,18	0,42	0,26	1,67	+0,6	4,9	0,81	0,58	0,84
10,90 - 10,98	0,60	0,14	0,17	0,08	1,34	0,42	0,19	1,67	0,0	4,6	0,24	1,32	1,51
10,98 - 11,07	0,87	0,20	0,19	0,11	0,97	0,37	0,23	1,35	+0,6	4,5	0,56	0,60	0,83
11,07 - 11,15	0,96	0,22	0,24	0,08	0,86	0,54	0,24	1,40	+0,2	4,5	0,50	0,70	0,94

Tableau A.2.25

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	ΔC	Σ	Na ⁺ ex.	SO ₄ ^{--★} ex.	H ⁺ calculée
9,98 - 10,07	0,87	0,20	0,06	0,02	1,07	0,35	0,23	1,42	+0,2	4,2	0,57	0,65	0,88
10,07 - 10,15	0,69	0,16	0,04	0,01	1,80	0,34	0,27	1,42	+0,7	4,7	0,40	0,87	1,14
10,15 - 10,23	0,66	0,15	0,04	0,03	2,05	0,41	0,26	1,88	+0,4	5,5	0,30	1,44	1,70
10,23 - 10,31	0,96	0,22	0,05	0,02	2,60	0,35	0,19	3,54	-0,2	7,9	0,65	2,65	2,84
10,31 - 10,40	0,90	0,21	0,04	0,02	2,32	0,28	0,29	2,63	+0,3	6,7	0,66	1,74	2,04
10,40 - 10,48	0,10	0,02	0,04	0,01	1,96	0,23	0,29	1,73	-0,1	4,4	-	1,72	2,12
10,48 - 10,58	0,68	0,16	0,08	0,03	2,37	0,24	0,33	2,29	+0,5	6,2	0,47	1,65	1,98
10,58 - 10,68	0,90	0,21	0,07	0,02	3,15	0,28	0,27	3,33	+0,5	8,2	0,66	2,45	2,72
10,68 - 10,79	0,83	0,19	0,06	0,03	0,88	0,37	0,30	1,45	-0,1	4,1	0,51	0,75	1,05
10,79 - 10,89	1,33	0,31	0,10	0,05	0,85	0,37	0,22	1,68	+0,4	4,9	1,02	0,33	0,55
10,89 - 10,96	0,72	0,17	0,17	0,05	1,96	0,34	0,15	2,21	+0,4	5,8	0,43	1,62	1,78
10,96 - 11,02	0,88	0,20	0,19	0,07	1,55	0,39	0,21	1,67	+0,6	5,2	0,54	0,92	1,13
11,02 - 11,09	0,96	0,22	0,04	0,04	1,17	0,42	0,22	1,50	+0,3	4,6	0,59	0,68	0,90
11,09 - 11,15	0,34	0,08	0,05	0,01	1,41	0,27	0,24	1,17	+0,2	3,6	0,11	1,00	1,24
11,15 - 11,23	0,97	0,22	0,10	0,04	1,08	0,28	0,27	1,40	+0,5	4,4	0,73	0,43	0,70
11,23 - 11,31	0,93	0,22	0,08	0,03	1,85	0,39	0,23	2,12	+0,4	5,9	0,60	1,31	1,54
11,31 - 11,39	1,56	0,36	0,07	0,04	1,01	0,56	0,25	2,02	+0,2	5,9	1,07	0,57	0,82
11,39 - 11,45	1,44	0,33	0,07	0,03	1,73	0,47	0,26	1,98	+0,9	6,3	1,04	0,59	0,85
11,45 - 11,51	1,04	0,24	0,07	0,03	2,57	0,40	0,22	2,71	+0,6	7,3	0,70	1,77	2,00
11,51 - 11,58	1,70	0,39	0,14	0,05	3,06	0,47	0,21	4,48	+0,2	10,5	1,29	2,76	2,97

Tableau A.2.25

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Σ	Na ⁺ _{ex.}	SO ₄ ^{--★} _{ex.}	H ⁺ _{calculée}
11,15 - 11,22	0,96	0,22	0,14	0,09	1,06	0,35	0,15	1,67	+0,3	4,6	0,65	0,78	0,93
11,22 - 11,28	1,44	0,33	0,08	0,10	1,05	0,35	0,23	1,81	+0,6	5,4	1,14	0,30	0,53
11,28 - 11,35	1,61	0,37	0,07	0,07	0,86	0,49	0,27	1,75	+0,5	5,5	1,19	0,16	0,43
11,35 - 11,41	1,28	0,30	0,08	0,05	1,50	0,60	0,26	1,79	+0,6	5,9	0,76	0,74	1,00
11,41 - 11,48	1,07	0,25	0,28	0,10	1,74	0,76	0,29	1,92	+0,5	6,4	0,41	1,30	1,59
11,48 - 11,58	1,71	0,39	1,00	0,30	6,20	0,63	0,13	7,10	+1,7	17,5	1,17	5,52	5,65
11,58 - 11,67	1,00	0,23	0,17	0,08	1,61	0,39	0,30	1,82	+0,6	5,6	0,66	0,92	1,22
11,67 - 11,74	1,16	0,27	0,12	0,09	0,74	0,29	0,26	1,42	+0,4	4,2	0,91	0,21	0,47
11,74 - 11,81	1,10	0,25	0,12	0,13	0,84	0,29	0,32	1,35	+0,4	4,4	0,85	0,22	0,54
11,81 - 11,88	1,22	0,28	0,09	0,10	1,41	0,34	0,31	2,29	+0,2	6,1	0,93	1,06	1,37
11,88 - 11,95	0,94	0,22	0,07	0,05	3,92	0,30	0,32	4,67	-0,1	10,5	0,68	3,76	4,08
11,95 - 12,02	0,72	0,17	0,14	0,06	6,40	0,31	0,16	7,10	-0,1	15,1	0,45	6,48	6,64
12,02 - 12,07	1,42	0,33	0,11	0,14	2,00	0,37	0,29	2,92	+0,4	7,6	1,11	1,46	1,75
12,07 - 12,13	1,27	0,29	0,12	0,07	0,82	0,34	0,40	1,29	+0,5	4,6	0,98	0,00	0,40
12,13 - 12,19	0,87	0,20	0,07	0,10	1,00	0,27	0,32	1,60	0,0	4,4	0,64	0,75	1,07
12,19 - 12,24	1,26	0,29	0,14	0,10	0,84	0,30	0,29	1,73	+0,3	4,9	1,01	0,40	0,69

Tableau A.2.25

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	ΔC	Σ	Na ⁺ ex.	SO ₄ ^{--★} ex.	H ⁺ calculée
12,24 - 12,31	1,18	0,27	0,28	0,15	0,87	0,34	0,29	1,88	+0,2	5,4	0,89	0,70	0,99
12,31 - 12,38	1,48	0,34	0,22	0,15	0,66	0,38	0,31	1,74	+0,4	5,3	1,15	0,21	0,52
12,38 - 12,44	1,28	0,29	0,14	0,13	1,15	0,29	0,22	2,13	+0,4	5,6	1,03	0,77	0,99
12,44 - 12,51	1,36	0,31	0,12	0,08	1,01	0,41	0,29	1,81	+0,4	5,4	1,01	0,47	0,76
12,51 - 12,58	0,87	0,20	0,09	0,05	1,29	0,36	0,23	1,63	+0,3	4,7	0,56	0,87	1,10
12,58 - 12,65	0,54	0,12	0,06	0,08	1,45	0,39	0,24	1,77	-0,2	4,7	0,20	1,46	1,70
12,65 - 12,71	1,02	0,23	0,12	0,13	1,32	0,36	0,23	1,64	+0,6	5,1	0,71	0,68	0,91
12,71 - 12,77	1,04	0,24	0,11	0,12	1,36	0,55	0,23	1,79	+0,4	5,5	0,57	1,00	1,23
12,77 - 12,83	1,83	0,42	0,08	0,13	0,79	0,96	0,27	1,46	+0,6	5,9	1,01	0,06	0,33
12,83 - 12,89	1,41	0,32	0,04	0,15	1,60	0,86	0,21	2,15	+0,3	6,7	0,67	1,19	1,40
12,89 - 12,96	1,00	0,23	0,14	0,12	1,24	0,74	0,20	1,77	0,0	5,4	0,37	1,22	1,49
12,96 - 13,02	1,53	0,35	0,18	0,10	1,35	0,92	0,25	1,67	+0,7	6,4	0,74	0,62	0,87
13,02 - 13,08	1,35	0,31	0,18	0,08	0,80	0,87	0,25	1,33	+0,3	5,2	0,60	0,46	0,71
13,08 - 13,17	1,41	0,33	0,28	0,13	0,59	1,15	0,18	1,06	+0,4	5,1	0,42	0,29	0,57
13,17 - 13,22	1,83	0,42	0,26	0,13	0,81	1,08	0,28	1,55	+0,5	6,4	0,91	0,27	0,55
13,22 - 13,27	2,78	0,64	0,15	0,15	0,68	1,55	0,30	1,99	+0,6	8,3	1,45	0,00	0,30
13,27 - 13,33	1,91	0,44	0,06	0,13	0,62	0,73	0,24	1,69	+0,5	5,8	1,28	0,00	0,24
13,33 - 13,38	0,42	0,10	0,10	0,13	0,90	0,44	0,23	0,82	+0,2	3,1	0,05	0,72	0,95
13,38 - 13,43	1,11	0,26	0,11	0,09	0,42	0,38	0,27	1,25	+0,1	3,9	0,78	0,20	0,47
13,43 - 13,50	1,13	0,26	0,08	0,14	0,84	0,34	0,31	1,40	+0,4	4,5	0,84	0,28	0,59
13,50 - 13,56	1,02	0,23	0,11	0,08	0,93	0,37	0,24	1,54	+0,2	4,5	0,71	0,59	0,83
13,56 - 13,63	1,07	0,25	0,08	0,08	1,32	0,39	0,24	1,63	+0,5	5,1	0,73	0,64	0,87
13,63 - 13,69	0,95	0,22	0,10	0,06	0,60	0,27	0,28	0,94	+0,4	3,4	0,71	0,00	0,28
13,69 - 13,77	1,15	0,27	0,17	0,13	0,82	0,26	0,24	1,30	+0,7	4,3	0,93	0,08	0,32

Tableau A.2.25

Profondeur (m)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Σ	Na ⁺ _{ex.}	SO ₄ ^{--★} _{ex.}	H ⁺ _{calculée}
14,37 - 14,43	0,89	0,20	0,11	0,05	1,13	0,33	0,17	1,41	+0,5	4,3	0,60	0,59	0,76
14,43 - 14,50	1,09	0,25	0,08	0,02	1,14	0,37	0,20	1,48	+0,5	4,6	0,77	0,44	0,64
14,50 - 14,56	0,80	0,18	0,06	0,03	1,21	0,29	0,21	1,52	+0,3	4,3	0,55	0,78	0,99
14,56 - 14,62	0,73	0,17	0,03	0,02	1,36	0,35	0,21	1,41	+0,3	4,3	0,43	0,82	1,03
14,62 - 14,68	0,58	0,13	0,03	0,02	1,14	0,31	0,21	1,10	+0,3	3,5	0,31	0,66	0,97
14,68 - 14,76	0,59	0,14	0,006	0,01	1,39	0,32	0,18	1,35	+0,3	4,0	0,32	0,91	1,09
14,76 - 14,82	1,06	0,24	0,08	0,02	1,22	0,34	0,18	1,52	+0,6	4,7	0,77	0,49	0,67
14,82 - 14,89	1,28	0,30	0,03	0,04	0,67	0,38	0,30	0,94	+0,7	3,9	0,96	0,00	0,30
14,89 - 14,97	0,60	0,14	0,11	0,03	1,29	0,33	0,16	1,48	+0,2	4,1	0,32	1,04	1,20
14,97 - 15,05	0,80	0,19	0,06	0,03	1,74	0,26	0,15	2,00	+0,4	5,2	0,58	1,23	1,38
15,05 - 15,13	1,56	0,36	0,08	0,05	0,85	0,30	0,27	1,98	+0,4	5,4	1,30	0,27	0,54
15,13 - 15,19	1,54	0,36	0,07	0,05	0,75	0,25	0,23	2,17	+0,1	5,3	1,32	0,43	0,66
15,19 - 15,25	1,43	0,33	0,04	0,04	0,78	0,24	0,23	1,75	+0,4	4,8	1,23	0,15	0,38
15,25 - 15,30	1,74	0,40	0,10	0,05	0,91	0,27	0,23	2,57	+0,1	6,3	1,51	0,60	0,83
15,30 - 15,36	1,17	0,27	0,08	0,04	1,71	0,24	0,21	2,51	+0,3	6,2	0,96	1,24	1,45
15,36 - 15,42	0,89	0,20	0,08	0,03	1,70	0,21	0,23	1,82	+0,6	5,2	0,70	0,88	1,11
15,42 - 15,47	0,83	0,19	0,06	0,03	1,38	0,26	0,28	1,67	+0,3	4,7	0,61	0,86	1,12
15,47 - 15,54	1,30	0,30	0,10	0,05	0,92	0,28	0,32	1,61	+0,5	4,9	1,06	0,21	0,52
15,54 - 15,60	0,36	0,08	0,14	0,02	1,55	0,26	0,22	1,14	+0,5	3,8	0,13	0,94	1,16
15,60 - 15,66	0,90	0,21	0,14	0,03	1,15	0,28	0,25	1,26	+0,6	4,2	0,66	0,38	0,63

Tableau A.2.25

Station	Distance de la côte(km)	Altitude	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/ Na	Cl ⁻ _{ex}	Na ⁺ _{ex}
D 10	4	272	241,0	2,7	7,5	9,2	28,7	0,9	431,0	20	86	1,8	-	1,4
D 24	17	602	62,0	2,8	2,0	2,2	7,3	2,1	105,0	40	79	1,7	-	3,6
D 40	33	848	61,0	3,4	1,4	2,4	7,2	0,9	110,0	9	30	1,8	0,2	-
D 47	100	1564	20,8	1,6	0,6	-	-	1,7	41,3	58	29	2,0	3,9	-
D 50	130	1746	22,1	3,4	0,6	-	-	1,0	38,8	42	26	1,8	-	0,5
D 52	150	1868	8,5	1,0	0,4	-	-	0,6	15,5	20	11	1,8	0,2	-
D 55	180	2028	7,3	1,1	0,2	-	-	1,0	15,0	26	19	2,1	1,9	-
D 57	200	2105	22,0	1,7	0,4	-	-	1,2	39,5	41	26	1,8	-	0,04
D 58	210	2186	13,1	3,3	0,6	-	-	1,0	24,5	31	17	1,9	0,9	-
D 61	240	2336	15,3	2,0	0,6	-	-	2,6	35,5	86	44	2,3	8,0	-
D 64	270	2370	9,9	0,9	0,2	-	-	1,1	19,0	26	15	1,9	1,2	-
D 66	290	2394	4,6	1,6	0,3	-	-	2,1	13,5	67	25	2,9	5,2	-
D 70	330	2432	13,7	1,8	0,4	-	-	1,6	27,0	57	23	2,0	2,3	-
D 73	360	2445	14,3	2,0	0,4	-	-	2,4	29,5	75	40	2,1	3,8	-
D 77	400	2444	20,0	2,7	0,3	-	-	1,3	38,1	45	23	1,9	2,1	-
D 80 (1)	430	2524	12,1	2,1	0,2	-	-	1,6	28,7	59	26	2,4	6,9	-
D 80 (2)	430	2524	22,1	1,2	0,4	-	-	2,2	49,2	81	32	2,2	9,4	-

Tableau A.2.26

Station	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Σ	Cl _{ex} ⁻	Na _{ex} ⁺⁺	SO _{4ex} ^{--★}	H ⁺ calculée
D 10	10,48	2,39	0,46	0,15	0,19	1,14	12,14	0,32	1,79	+0,6	29,1	-	0,06	0,41	0,73
D 24	2,69	0,61	0,11	0,16	0,05	2,11	2,96	0,65	1,65	+0,5	11,0	-	0,16	1,14	1,80
D 40	2,65	0,60	0,12	0,19	0,04	0,85	3,10	0,15	0,63	+0,6	8,3	0,00	-	0,31	0,46
D 47	0,91	(0,21)	-	0,09	0,01	1,74	1,16	0,93	0,61	+0,3	5,7	0,11	-	0,50	1,54
D 50	0,96	(0,22)	-	0,19	0,01	1,00	1,09	0,67	0,54	+0,1	4,7	-	0,02	0,39	1,06
D 52	0,37	(0,08)	-	0,06	0,01	0,60	0,44	0,32	0,22	+0,1	2,1	0,00	-	0,18	0,50
D 55	0,32	(0,07)	-	0,06	0,00	1,00	0,42	0,42	0,39	+0,2	2,7	0,05	-	0,35	0,82
D 57	0,96	(0,22)	-	0,10	0,01	1,24	1,11	0,66	0,54	+0,2	4,8	-	0,00	0,41	1,07
D 58	0,57	(0,13)	-	0,18	0,01	1,00	0,69	0,50	0,36	+0,3	3,4	0,03	-	0,29	0,82
D 61	0,67	(0,15)	-	0,11	0,01	2,57	1,00	1,39	0,92	+0,2	6,8	0,23	-	0,84	2,46
D 64	0,43	(0,10)	-	0,05	0,00	1,05	0,54	0,42	0,31	+0,4	2,9	0,03	-	0,26	0,71
D 66	0,20	(0,05)	-	0,09	0,01	2,06	0,38	1,09	0,53	+0,4	4,4	0,15	-	0,51	1,75
D 70	0,60	(0,14)	-	0,10	0,01	1,56	0,76	0,92	0,48	+0,2	4,6	0,06	-	0,41	1,39
D 73	0,62	(0,14)	-	0,11	0,01	2,44	0,83	1,22	0,83	+0,4	6,2	0,11	-	0,75	2,08
D 77	0,87	(0,20)	-	0,15	0,01	0,27	1,07	0,72	0,47	+0,2	4,8	0,06	-	0,36	1,14
D 80 (1)	0,53	(0,12)	-	0,12	0,00	1,60	0,81	0,95	0,54	+0,1	4,7	0,19	-	0,48	1,62
D 80 (2)	0,96	(0,22)	-	0,07	0,01	2,20	1,39	1,31	0,67	+0,1	6,8	0,26	-	0,55	2,12

Tableau A.2.27

Profondeur	SO ₄ ^{--★} _{ex}	Profondeur	SO ₄ ^{--★} _{ex}	Profondeur	SO ₄ ^{--★} _{ex}
0,60 - 0,65	1,45 ± 0,00	1,85 - 1,90	1,45 ± 0,10	3,17 - 3,22	0,60 ± 0,04
0,65 - 0,70	0,94 ± 0,04	1,00 - 1,95	1,79 ± 0,16	3,22 - 3,28	1,34 ± 0,21
0,70 - 0,75	0,99 ± 0,04	1,95 - 2,00	1,43 ± 0,07	3,28 - 3,34	1,05 ± 0,01
0,75 - 0,80	0,65 ± 0,05	2,00 - 2,05	1,93 ± 0,30	3,34 - 3,40	0,68 ± 0,01
0,80 - 0,85	0,92 ± 0,01	2,05 - 2,10	2,71 ± 0,07	3,40 - 3,45	1,07 ± 0,12
0,85 - 0,90	0,80 ± 0,02	2,10 - 2,15	2,07 ± 0,32	3,45 - 3,50	1,23 ± 0,00
0,90 - 0,95	1,26 ± 0,07	2,15 - 2,20	1,11 ± 0,06	3,50 - 3,55	1,50 ± 0,14
0,95 - 1,00	1,34 ± 0,01	2,20 - 2,25	1,54 ± 0,24	3,55 - 3,60	1,21 ± 0,01
1,00 - 1,05	1,08 ± 0,25	2,25 - 2,30	0,95 ± 0,05	3,60 - 3,65	1,28 ± 0,08
1,05 - 1,10	0,97 ± 0,10	2,30 - 2,35	1,38 ± 0,07	3,65 - 3,71	0,92 ± 0,20
1,10 - 1,15	0,97 ± 0,02	2,35 - 2,40	1,58 ± 0,18	3,71 - 3,76	1,29 ± 0,02
1,15 - 1,20	1,06 ± 0,22	2,40 - 2,45	1,25 ± 0,28	3,76 - 3,81	1,23 ± 0,13
1,20 - 1,25	1,90 ± 0,15	2,45 - 2,50	1,25 ± 0,19	3,81 - 3,87	1,39 ± 0,17
1,25 - 1,30	3,06 ± 0,11	2,50 - 2,55	1,26 ± 0,07	3,87 - 3,92	0,96 ± 0,07
1,30 - 1,35	4,56 ± 0,16	2,55 - 2,60	1,15 ± 0,28	3,92 - 3,97	1,08 ± 0,17
1,35 - 1,40	4,00 ± 0,40	2,60 - 2,65	2,18 ± 0,23	3,97 - 4,03	1,58 ± 0,03
1,40 - 1,45	1,12 ± 0,22	2,65 - 2,71	1,23 ± 0,12	4,03 - 4,08	1,66 ± 0,13
1,45 - 1,50	0,78 ± 0,28	2,71 - 2,77	0,97 ± 0,08	4,08 - 4,14	1,00 ± 0,13
1,50 - 1,55	0,72 ± 0,22	2,77 - 2,83	1,28 ± 0,10	4,14 - 4,19	1,29 ± 0,12
1,55 - 1,60	1,86 ± 0,24	2,83 - 2,88	1,44 ± 0,05	4,19 - 4,25	1,47 ± 0,13
1,60 - 1,65	1,80 ± 0,50	2,88 - 2,94	1,59 ± 0,23	4,25 - 4,30	1,36 ± 0,25
1,65 - 1,70	1,24 ± 0,08	2,94 - 3,00	1,35 ± 0,00	4,30 - 4,36	1,45 ± 0,14
1,70 - 1,75	1,49 ± 0,06	3,00 - 3,05	1,13 ± 0,04	4,36 - 4,41	1,44 ± 0,23
1,75 - 1,80	1,52 ± 0,00	3,05 - 3,11	1,46 ± 0,05	4,41 - 4,47	1,21 ± 0,08
1,80 - 1,85	0,95 ± 0,12	3,11 - 3,17	0,95 ± 0,13	4,47 - 4,52	2,26 ± 0,12

Tableau A.2.28

Profondeur	SO ₄ ²⁻ ★ ex	Profondeur	SO ₄ ²⁻ ★ ex	Profondeur	SO ₄ ²⁻ ★ ex
4,52 - 4,57	1,32 ± 0,20	5,78 - 5,83	2,24 ± 0,34	7,05 - 7,10	1,45 ± 0,04
4,57 - 4,62	1,21 ± 0,06	5,83 - 5,88	2,39 ± 0,35	7,10 - 7,16	1,57 ± 0,17
4,62 - 4,67	1,06 ± 0,30	5,88 - 5,93	1,13 ± 0,24	7,16 - 7,21	2,37 ± 0,43
4,67 - 4,72	1,67 ± 0,28	5,93 - 5,98	0,87 ± 0,16	7,21 - 7,26	1,80 ± 0,10
4,72 - 4,77	1,48 ± 0,02	5,98 - 6,03	0,87 ± 0,37	7,26 - 7,31	1,46 ± 0,29
4,77 - 4,83	1,48 ± 0,11	6,03 - 6,09	0,27 ± 0,27	7,31 - 7,36	1,27 ± 0,25
4,83 - 4,88	1,54 ± 0,09	6,09 - 6,14	0,79 ± 0,33	7,36 - 7,41	1,17 ± 0,15
4,88 - 4,93	1,91 ± 0,57	6,14 - 6,19	1,38 ± 0,12	7,41 - 7,46	1,20 ± 0,25
4,93 - 4,98	0,63 ± 0,19	6,19 - 6,24	0,71 ± 0,07	7,46 - 7,51	1,30 ± 0,24
4,98 - 5,01	1,02 ± 0,04	6,24 - 6,29	1,20 ± 0,07	7,51 - 7,56	2,33 ± 0,36
5,01 - 5,06	0,71 ± 0,22	6,29 - 6,34	1,60 ± 0,00	7,56 - 7,62	2,06 ± 0,46
5,06 - 5,11	1,16 ± 0,13	6,34 - 6,39	1,75 ± 0,04	7,62 - 7,67	2,24 ± 0,42
5,11 - 5,16	0,74 ± 0,07	6,39 - 6,44	1,28 ± 0,24	7,67 - 7,72	2,94 ± 0,08
5,16 - 5,22	1,00 ± 0,36	6,44 - 6,49	1,63 ± 0,12	7,72 - 7,77	2,77 ± 0,43
5,22 - 5,27	0,85 ± 0,17	6,49 - 6,54	1,22 ± 0,12	7,77 - 7,82	1,70 ± 0,18
5,27 - 5,32	1,15 ± 0,48	6,54 - 6,59	0,94 ± 0,13	7,82 - 7,87	0,91 ± 0,02
5,32 - 5,37	0,84 ± 0,10	6,59 - 6,64	1,01 ± 0,05	7,87 - 7,92	0,70 ± 0,09
5,37 - 5,42	0,97 ± 0,16	6,64 - 6,70	2,32 ± 0,37	7,92 - 7,97	0,53 ± 0,18
5,42 - 5,47	1,33 ± 0,20	6,70 - 6,75	1,69 ± 0,20	7,97 - 8,02	0,45 ± 0,00
5,47 - 5,52	0,76 ± 0,29	6,75 - 6,80	0,91 ± 0,26	8,02 - 8,07	0,76 ± 0,16
5,52 - 5,57	0,70 ± 0,17	6,80 - 6,85	1,17 ± 0,07	8,07 - 8,12	1,60 ± 0,17
5,57 - 5,63	0,27 ± 0,00	6,85 - 6,90	1,44 ± 0,09	8,12 - 8,16	0,93 ± 0,40
5,63 - 5,68	1,06 ± 0,10	6,90 - 6,95	1,60 ± 0,16	8,16 - 8,21	1,39 ± 0,20
5,68 - 5,73	1,81 ± 0,19	6,95 - 7,00	1,78 ± 0,30	8,21 - 8,26	0,95 ± 0,17
5,73 - 5,78	1,16 ± 0,17	7,00 - 7,05	0,88 ± 0,12	8,26 - 8,31	0,74 ± 0,14

Tableau A.2.28

Profondeur	SO ₄ ^{--★} ex	Profondeur	SO ₄ ^{--★} ex	Profondeur	SO ₄ ^{--★} ex
8,31 - 8,36	0,72 ± 0,17	9,56 - 9,61	0,27 ± 0,07	11,28 - 11,35	0,38 ± 0,22
8,36 - 8,41	0,89 ± 0,31	9,61 - 9,66	0,80 ± 0,05	11,35 - 11,41	0,99 ± 0,25
8,41 - 8,46	0,23 ± 0,15	9,66 - 9,71	0,35 ± 0,10	11,41 - 11,48	1,38 ± 0,08
8,46 - 8,51	0,44 ± 0,26	9,71 - 9,76	0,74 ± 0,11	11,48 - 11,58	5,80 ± 0,28
8,51 - 8,56	0,89 ± 0,08	9,76 - 9,80	1,27 ± 0,03	11,58 - 11,67	1,12 ± 0,20
8,56 - 8,61	0,85 ± 0,02	9,80 - 9,85	1,04 ± 0,11	11,67 - 11,74	0,35 ± 0,14
8,61 - 8,65	0,78 ± 0,10	9,85 - 9,90	0,59 ± 0,13	11,74 - 11,81	0,37 ± 0,15
8,65 - 8,70	0,99 ± 0,11	9,90 - 9,96	0,07 ± 0,07	11,81 - 11,88	1,08 ± 0,02
8,70 - 8,75	1,01 ± 0,24	9,96 - 10,03	1,08 ± 0,06	11,88 - 11,95	3,68 ± 0,08
8,75 - 8,80	0,63 ± 0,38	10,03 - 10,10	0,76 ± 0,08	11,95 - 12,02	6,36 ± 0,12
8,80 - 8,85	0,16 ± 0,16	10,10 - 10,18	1,25 ± 0,11	12,02 - 12,07	1,59 ± 0,13
8,85 - 8,90	1,57 ± 0,12	10,18 - 10,25	2,29 ± 0,01	12,07 - 12,13	0,41 ± 0,01
8,90 - 8,95	0,86 ± 0,20	10,25 - 10,36	0,59 ± 0,14	12,13 - 12,19	0,71 ± 0,03
8,95 - 9,00	0,03 ± 0,03	10,36 - 10,44	0,46 ± 0,20	12,19 - 12,24	0,48 ± 0,08
9,00 - 9,06	0,24 ± 0,24	10,44 - 10,52	1,36 ± 0,01	12,24 - 12,31	0,64 ± 0,06
9,06 - 9,11	0,91 ± 0,06	10,52 - 10,60	2,57 ± 0,10	12,31 - 12,38	0,28 ± 0,07
9,11 - 9,16	0,67 ± 0,12	10,60 - 10,68	1,00 ± 0,14	12,38 - 12,44	0,85 ± 0,08
9,16 - 9,21	1,52 ± 0,07	10,68 - 10,76	0,49 ± 0,15	12,44 - 12,51	0,60 ± 0,13
9,21 - 9,26	1,71 ± 0,46	10,76 - 10,83	0,40 ± 0,05	12,51 - 12,58	0,97 ± 0,10
9,26 - 9,31	1,85 ± 0,00	10,83 - 10,90	0,75 ± 0,17	12,58 - 12,65	1,34 ± 0,12
9,31 - 9,36	0,76 ± 0,11	10,90 - 10,98	1,24 ± 0,08	12,65 - 12,71	0,89 ± 0,21
9,36 - 9,41	0,96 ± 0,08	10,98 - 11,07	0,67 ± 0,03	12,71 - 12,77	1,07 ± 0,07
9,41 - 9,46	0,43 ± 0,18	11,07 - 11,15	0,66 ± 0,04	12,77 - 12,83	0,29 ± 0,23
9,46 - 9,51	0,74 ± 0,04	11,15 - 11,22	0,85 ± 0,07	12,83 - 12,89	1,29 ± 0,10
9,51 - 9,56	1,19 ± 0,06	11,22 - 11,28	0,56 ± 0,26	12,89 - 12,96	1,13 ± 0,09

Tableau A.2.28

Profondeur	$\text{SO}_4^{--\star} \text{ ex}$	Profondeur	$\text{SO}_4^{--\star} \text{ ex}$	Profondeur	$\text{SO}_4^{--\star} \text{ ex}$
12,96 - 13,02	$0,86 \pm 0,24$	13,69 - 13,77	$0,33 \pm 0,25$	15,05 - 15,13	$0,43 \pm 0,16$
13,02 - 13,08	$0,51 \pm 0,05$	13,90 - 14,10	$0,58 \pm 0,26$	15,13 - 15,19	$0,48 \pm 0,05$
13,08 - 13,17	$0,40 \pm 0,01$	14,37 - 14,43	$0,78 \pm 0,19$	15,19 - 15,25	$0,35 \pm 0,20$
13,17 - 13,22	$0,40 \pm 0,13$	14,43 - 14,50	$0,69 \pm 0,25$	15,25 - 15,30	$0,64 \pm 0,04$
13,22 - 13,27	$0,19 \pm 0,19$	14,50 - 14,56	$0,89 \pm 0,11$	15,30 - 15,36	$1,37 \pm 0,13$
13,27 - 13,33	$0,19 \pm 0,19$	14,56 - 14,62	$1,00 \pm 0,18$	15,36 - 15,42	$1,18 \pm 0,30$
13,33 - 13,38	$0,70 \pm 0,02$	14,62 - 14,68	$0,80 \pm 0,14$	15,42 - 15,47	$0,98 \pm 0,12$
13,38 - 13,43	$0,17 \pm 0,03$	14,68 - 14,76	$1,06 \pm 0,15$	15,47 - 15,54	$0,41 \pm 0,20$
13,43 - 13,50	$0,41 \pm 0,13$	14,76 - 14,82	$0,77 \pm 0,28$	15,54 - 15,60	$1,14 \pm 0,20$
13,50 - 13,56	$0,64 \pm 0,05$	14,82 - 14,89	$0,19 \pm 0,19$	15,60 - 15,66	$0,64 \pm 0,26$
13,56 - 13,63	$0,86 \pm 0,22$	14,89 - 14,97	$1,10 \pm 0,06$	-	-
13,63 - 23,69	$0,16 \pm 0,16$	14,97 - 15,05	$1,41 \pm 0,18$	-	-

Tableau A.2.28

Profondeur (m de glace)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Al	Cl/Na _m
129,5	24,7	2,2	0,5	5,7	32,0	23	280	1,1	1,3
166,9	40,0	2,5	7,0	1,3	26,4	128	120	16,5	0,7
175,9	22,0	3,5	0,8	1,4	16,2	27	101	1,4	0,7
191,8	28,5	3,4	3,0	1,8	10,2	46	101	1,7	0,4
244,8	15,0	2,0	0,5	2,9	8,2	97	96	1,4	0,6
257,6	13,2	2,0	0,5	2,0	9,4	16	107	2,6	0,7
261,5	21,9	2,0	1,8	3,9	17,4	15	217	3,6	0,8
279,1	44,9	1,3	1,8	0,6	14,8	15	115	1,9	0,3
288,9	49,9	2,8	1,8	1,0	14,8	16	136	5,8	0,3
296,9	51,4	2,0	2,0	3,1	10,8	30	225	5,8	0,2
353,0	102,0	2,0	4,5	2,3	136,0	38	178	24,6	1,4
404,0	186,0	2,0	12,0	1,7	246,0	190	286	133,5	1,6
448,0	170,0	3,2	10,0	1,8	226,0	150	230	121,0	1,6
503,0	120,0	3,2	8,0	1,8	150,0	89	208	60,2	1,4
601,0	111,0	2,5	5,4	2,1	159,0	25	165	22,5	1,5
699,0	73,0	2,0	3,5	2,5	84,0	27	175	14,6	1,2
778,0	110,0	4,2	6,0	3,2	145,0	65	275	34,2	1,4
799,9	74,3	1,2	3,2	2,0	114,0	45	106	17,5	1,6

Tableau A.2.29

Profondeur (m de glace)	Na ⁺	Na _m ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	ΔC	ΔC ₁	ΔC ₂	Σ
129,5	1,07	1,06	0,24	0,05	0,12	0,01	5,70	0,90	0,37	5,83	0,0	+ 0,1	+ 0,1	14,3
166,9	1,74	1,54	0,35	0,08	0,14	0,18	1,30	0,74	2,06	2,50	- 1,6	- 1,5	- 1,5	8,9
175,9	0,96	0,94	0,22	0,04	0,19	0,02	1,40	0,46	0,44	2,10	- 0,2	- 0,2	- 0,2	5,8
191,8	1,24	1,22	0,28	0,05	0,19	0,08	1,80	0,29	0,74	2,10	+ 0,5	+ 0,5	+ 0,5	6,8
244,8	0,65	0,64	0,15	0,03	0,11	0,01	2,90	0,23	1,56	2,00	0,0	0,0	+ 0,0	7,6
257,6	0,57	0,54	0,12	0,03	0,11	0,01	2,0	0,26	0,26	2,23	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	5,6
261,5	0,95	0,91	0,21	0,04	0,11	0,05	3,90	0,49	0,24	4,52	0,0	0,0	+ 0,1	10,6
279,1	1,95	1,93	0,44	0,08	0,07	0,05	0,65	0,42	0,24	2,40	+ 0,1	+ 0,2	+ 0,2	6,3
288,9	2,17	2,10	0,48	0,09	0,16	0,05	1,05	0,42	0,25	2,83	+ 0,4	+ 0,4	+ 0,6	7,6
296,9	2,23	2,16	0,50	0,10	0,11	0,05	3,10	0,30	0,48	4,69	+ 0,5	+ 0,5	+ 0,6	11,6
353,0	4,43	4,13	0,95	0,18	0,11	0,12	2,30	3,83	0,61	3,71	- 0,2	- 0,4	+ 0,4	16,7
404,0	8,09	6,44	1,48	0,28	0,11	0,31	1,70	6,93	3,06	5,96	- 4,2	- 5,6	- 1,5	30,4
448,0	7,42	5,91	1,36	0,26	0,18	0,26	1,80	6,37	2,42	4,79	- 2,6	- 3,8	- 0,1	27,1
503,0	5,22	4,47	1,03	0,20	0,18	0,21	1,80	4,23	1,44	4,33	- 1,6	- 2,1	- 0,2	19,8
601,0	4,83	4,55	1,05	0,20	0,14	1,14	2,10	4,48	0,40	3,44	- 0,1	- 0,1	+ 0,6	17,2
699,0	3,17	2,99	0,69	0,13	0,11	0,09	2,20	2,37	0,44	3,65	- 0,2	- 0,2	+ 0,3	13,2
778,0	4,78	4,36	1,00	0,19	0,23	0,15	3,20	4,08	1,05	5,73	- 1,5	- 1,7	- 0,7	21,1
799,9	3,23	3,01	0,69	0,13	0,07	0,08	2,00	3,21	0,73	2,21	- 0,1	- 0,2	+ 0,3	12,6

Tableau A.2.30

Profondeur (m de glace)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na
104,25	17,2	2,2	1,4	1,4	30,1	47	32	1,8
155,34	30,3	2,3	1,4	1,5	53,2	36	43	1,8
198,64	31,4	1,8	3,2	1,5	57,3	44	39	1,8
253,10	34,2	1,6	2,5	1,4	62,5	36	46	1,8
303,28	16,7	1,6	1,5	1,5	31,0	48	33	1,9
399,39	48,7	5,4	1,9	2,4	85,5	53	81	1,8
451,27	13,7	2,9	1,0	1,7	28,4	52	36	2,1
500,41	30,5	8,0	6,5	0,6	52,7	25	25	1,7
550,99	29,4	7,0	3,2	1,2	50,5	32	39	1,7
598,69	19,7	7,2	2,3	0,7	27,3	25	23	1,4
651,15	28,9	5,1	2,5	1,2	53,9	26	39	1,9
698,59	21,4	5,3	2,9	1,0	29,3	39	29	1,4
749,52	17,7	4,3	3,2	1,1	27,1	33	33	1,5
799,35	35,8	8,4	5,9	0,6	48,6	19	40	1,4
849,04	26,7	6,7	2,0	0,5	28,6	29	24	1,1
897,35	25,1	2,8	2,5	1,2	44,1	36	30	1,8
948,55	13,4	2,7	1,2	2,1	34,1	43	64	2,5
993,96	16,1	2,1	0,5	1,5	27,4	49	32	1,7
1045,57	11,8	2,1	0,5	2,4	33,7	50	58	2,9

Tableau A.2.31

Profondeur (m de glace)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na
1094,05	18,7	4,0	0,8	1,70	36,1	47	38	1,9
1142,97	21,2	2,0	0,8	2,0	40,4	66	42	1,9
1244,87	41,2	0,9	2,7	1,8	83,0	47	53	2,0
1340,27	67,2	3,0	4,0	1,7	139,4	55	56	2,1
1392,80	57,2	1,6	2,9	1,7	109,7	47	54	1,9
1439,15	70,6	2,5	4,6	2,1	136,5	50	87	1,9
1488,44	54,0	3,7	2,1	1,8	99,2	49	53	1,8
1536,83	54,4	3,7	2,8	2,1	104,8	46	67	1,9
1586,11	44,9	2,0	1,9	2,5	84,6	50	78	1,9
1635,41	46,2	1,7	1,8	1,7	90,4	48	44	2,0
1684,29	41,1	1,5	1,9	2,2	82,7	55	51	2,0
1732,68	40,1	2,4	2,0	1,7	77,4	45	46	1,9
1782,75	40,1	1,1	2,5	1,5	67,8	41	43	1,7
1830,41	21,6	0,8	1,0	2,1	40,4	50	59	1,9
1879,20	35,8	1,7	1,6	1,6	63,5	44	44	1,8
1928,08	33,7	1,9	1,6	1,9	67,7	48	48	2,0
1975,03	30,0	3,4	1,2	2,5	72,1	44	74	2,4
2024,05	47,1	1,2	3,0	1,8	84,6	45	54	1,8
2074,14	25,1	0,8	0,8	1,4	45,0	34	39	1,8
2122,54	24,6	0,6	1,0	1,5	47,0	40	45	1,9

Tableau A.2.31

Profondeur (m de glace)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	ΔC	ΔC ₁	Σ	ΔC ₂	Na ⁺ _m	Al
104,25	0,75	0,17	0,03	0,04	0,12	1,37	0,85	0,76	0,66	+ 0,2	+ 0,2	4,8	+ 0,2	0,75	-
155,34	1,32	0,30	0,06	0,04	0,13	1,54	1,50	0,58	0,90	+ 0,3	+ 0,4	6,4	+ 0,4	1,32	-
198,64	1,37	0,32	0,06	0,08	0,10	1,50	1,62	0,71	0,63	+ 0,4	+ 0,5	6,4	+ 0,5	1,37	-
253,10	1,49	0,34	0,07	0,06	0,09	1,37	1,76	0,58	0,96	0,0	+ 0,1	6,7	+ 0,1	1,49	-
303,28	0,73	0,17	0,03	0,07	0,09	1,50	0,87	0,77	0,68	+ 0,2	+ 0,3	4,9	+ 0,3	0,73	-
399,39	2,12	0,49	0,09	0,05	0,30	2,38	2,41	0,85	1,70	+ 0,4	+ 0,5	10,4	+ 0,5	2,12	-
451,27	0,60	0,14	0,03	0,03	0,16	1,70	0,80	0,83	0,74	+ 0,3	+ 0,3	5,0	+ 0,3	0,60	-
500,41	1,33	0,31	0,06	0,17	0,44	0,55	1,49	0,40	0,52	+ 0,4	+ 0,4	5,3	+ 0,4	1,33	-
550,99	1,28	0,29	0,06	0,08	0,39	1,20	1,42	0,51	0,81	+ 0,5	+ 0,6	6,0	+ 0,6	1,28	-
598,69	0,86	0,20	0,04	0,06	0,40	0,71	0,77	0,40	0,47	+ 0,6	+ 0,6	3,9	+ 0,6	0,86	-
651,15	1,25	0,29	0,06	0,03	0,28	1,18	1,51	0,41	0,82	+ 0,3	+ 0,3	5,8	+ 0,3	1,25	-
698,59	0,93	0,21	0,04	0,07	0,29	0,95	0,83	0,63	0,60	+ 0,4	+ 0,4	4,6	+ 0,4	0,93	-
749,72	0,77	0,18	0,03	0,08	0,24	1,06	1,76	0,53	0,68	+ 0,4	+ 0,4	4,3	+ 0,4	0,77	-
799,35	1,56	0,36	0,07	0,15	0,47	0,60	1,37	0,30	0,80	+ 0,6	+ 0,7	5,7	+ 0,7	1,56	-
849,04	1,17	0,27	0,05	0,05	0,37	0,52	0,81	0,47	0,51	+ 0,6	+ 0,6	4,2	+ 0,6	1,17	-
897,35	1,09	0,25	0,05	0,06	0,16	1,20	1,24	0,58	0,63	+ 0,3	+ 0,4	5,3	+ 0,4	1,09	-
948,55	0,58	0,13	0,03	0,03	0,15	2,14	0,96	0,70	1,33	0,0	+ 0,1	6,1	+ 0,1	0,58	-
993,96	0,70	0,16	0,03	0,01	0,12	1,45	0,77	0,79	0,67	+ 0,2	+ 0,2	4,7	+ 0,2	0,70	-
1045,57	0,51	0,12	0,02	0,01	0,11	2,35	0,95	0,81	1,21	+ 0,1	+ 0,1	6,1	+ 0,1	0,51	-
1094,05	0,81	0,19	0,04	0,02	0,22	1,70	1,02	1,76	0,80	+ 0,4	+ 0,4	5,6	+ 0,4	0,81	-

Tableau A.2.32

Profondeur (m de glace)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Δc ₁	Σ	Δc ₂	Na ⁺ _m	Al
1142,97	0,92	0,21	0,04	0,02	0,11	1,99	1,14	1,07	0,88	+ 0,2	+ 0,3	6,4	+ 0,2	0,92	-
1244,87	1,79	0,38	0,007	0,02	0,05	1,75	2,34	0,76	1,10	- 0,2	- 0,3	8,5	+ 0,1	1,65	11,4
1340,27	2,92	0,64	0,12	0,10	0,17	1,65	3,93	0,89	1,16	- 0,5	- 0,5	11,8	- 0,2	2,78	11,4
1392,80	2,49	0,54	0,10	0,07	0,09	1,70	3,09	0,75	1,13	-0,05	- 0,1	10,2	+ 0,2	2,35	11,4
1439,15	3,07	0,67	0,13	0,12	0,14	2,11	3,84	0,80	1,82	- 0,3	- 0,4	12,9	0,0	2,93	11,4
1488,44	2,35	0,51	0,10	0,05	0,21	1,77	2,79	0,79	1,10	+ 0,2	+ 0,2	9,9	+ 0,6	2,21	11,4
1536,83	2,37	0,51	0,10	0,07	0,21	2,10	2,95	0,74	1,40	+ 0,2	+ 0,1	10,6	+ 0,5	2,23	11,4
1586,11	1,96	0,42	0,09	0,05	0,11	2,50	2,39	0,81	1,63	+ 0,2	+ 0,2	10,2	+ 0,5	1,82	11,4
1635,41	2,01	0,43	0,09	0,05	0,09	1,70	2,55	0,77	0,92	+ 0,1	0,0	8,8	+ 0,4	1,87	11,4
1684,29	1,79	0,41	0,08	0,02	0,11	2,16	2,33	0,88	1,07	+ 0,2	+ 0,3	8,9	+ 0,3	1,79	-
1732,68	1,74	0,40	0,08	0,05	0,11	1,70	2,18	0,73	0,96	+ 0,1	+ 0,2	8,0	+ 0,2	1,74	-
1782,75	1,74	0,40	0,08	0,06	0,14	1,50	1,91	0,65	0,89	+ 0,4	+ 0,5	5,4	+ 0,5	1,74	-
1830,41	0,94	0,22	0,04	0,03	0,06	2,10	1,14	0,80	1,22	+ 0,2	+ 0,2	6,6	+ 0,2	0,94	-
1879,20	1,56	0,36	0,07	0,04	0,09	1,55	1,79	0,70	0,92	+ 0,2	+ 0,3	7,1	+ 0,3	1,56	-
1928,08	1,47	0,34	0,06	0,04	0,09	1,85	1,91	0,77	0,99	+ 0,1	+ 0,2	7,5	+ 0,2	1,47	-
1975,03	1,31	0,30	0,06	0,03	0,07	2,53	2,03	0,71	1,54	0,0	0,0	8,6	0,0	1,31	-
2024,05	2,04	0,47	0,09	0,08	0,17	1,75	2,39	0,73	1,12	+ 0,3	+ 0,4	8,8	+ 0,4	2,04	-
2074,14	1,09	0,25	0,05	0,02	0,04	1,40	1,27	0,55	0,82	+ 0,2	+ 0,2	5,5	+ 0,2	1,09	-
2122,54	1,07	0,25	0,05	0,03	0,03	1,50	1,33	0,65	0,94	0,0	0,0	5,9	0,0	1,07	-

Tableau A.2.32

Profondeur (m)	Al	NO ₃ ⁻	(Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺) _{ex.}	Na ⁺ _m	Cl ⁻	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}	SO ₄ ⁻⁻	SO _{4(a)} ⁻⁻ _{ex.}	SO _{4(b)} ⁻⁻ _{ex.}	SO ₄ ⁻⁻ ★ _{ex.}	H ⁺ calculée	H ⁺
104,25	-	0,76	-	0,75	0,85	-	0,02	0,66	0,54	0,54	0,54	1,30	1,37
155,34	-	0,58	-	1,32	1,50	-	0,03	0,90	0,70	0,70	0,70	1,28	1,54
198,64	-	0,71	-	1,37	1,62	0,02	-	0,63	0,46	0,46	0,46	1,19	1,50
253,10	-	0,58	-	1,49	1,76	0,02	-	0,96	0,78	0,78	0,78	1,38	1,37
303,28	-	0,77	-	0,73	0,87	0,02	-	0,68	0,59	0,59	0,59	1,38	1,50
399,39	-	0,85	-	2,12	2,41	-	0,05	1,70	1,37	1,37	1,37	2,23	2,38
451,27	-	0,83	-	0,60	0,80	0,10	-	0,74	0,67	0,67	0,67	1,60	1,70
500,41	-	0,40	-	1,33	1,49	-	0,05	0,52	0,29	0,29	0,29	0,69	0,55
550,59	-	0,51	-	1,28	1,42	-	0,06	0,81	0,58	0,58	0,58	1,09	1,20
598,69	-	0,40	-	0,86	0,77	-	0,20	0,47	0,13	0,13	0,13	0,53	0,71
651,15	-	0,41	-	1,25	1,51	0,05	-	0,82	0,67	0,67	0,67	1,13	1,18
698,59	-	0,63	-	0,93	0,83	-	0,22	0,60	0,23	0,23	0,23	0,86	0,95
749,72	-	0,53	-	0,77	0,76	-	0,12	0,68	0,45	0,45	0,45	0,98	1,06
799,35	-	0,30	-	1,56	1,37	-	0,38	0,83	0,19	0,19	0,19	0,49	0,60
849,04	-	0,47	-	1,17	0,81	-	0,47	0,51	-0,18	-0,18	-0,18	0,47	0,52
897,35	-	0,58	-	1,09	1,24	-	0,03	0,63	0,46	0,46	0,46	1,04	1,20
948,55	-	0,70	-	0,58	0,96	0,28	-	1,33	1,26	1,26	1,26	2,24	2,14
993,96	-	0,79	-	0,70	0,77	-	0,04	0,67	0,54	0,54	0,54	1,33	1,45
1045,57	-	0,81	-	0,51	0,95	0,36	-	1,21	1,15	1,15	1,15	2,32	2,35
1094,05	-	0,76	-	0,81	1,02	0,08	-	0,80	0,70	0,70	0,70	1,54	1,70

Tableau A.2.33

Profondeur (m)	Al	NO ₃ ⁻	(Ca ⁺⁺ + Mg ⁺⁺) _{ex.}	Na ⁺ _{m.}	Cl ⁻	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex.}	SO ₄ ⁻⁻	SO _{4(a)} ⁻⁻ _{ex.}	SO _{4(b)} ⁻⁻ _{ex.}	SO ₄ ^{--★} _{ex.}	H ⁺ calculée	H ⁺
1142,97	-	1,07	-	0,92	1,14	0,07	-	0,88	0,77	0,77	0,77	1,91	1,99
1244,87	11,4	0,76	0,35	1,65	2,34	0,42	-	1,10	0,90	0,55	0,62	1,73	1,75
1340,27	11,4	0,89	0,35	2,78	3,93	0,69	-	1,16	0,82	0,47	0,54	2,05	1,65
1392,80	11,4	0,75	0,35	2,35	3,09	0,35	-	1,13	0,85	0,50	0,57	1,60	1,70
1439,15	11,4	0,80	0,35	2,93	3,84	0,42	-	1,82	1,47	1,12	1,19	2,34	2,11
1488,44	11,4	0,79	0,35	2,21	2,79	0,21	-	1,10	0,83	0,48	0,55	1,48	1,77
1536,83	11,4	0,74	0,35	2,23	2,95	0,35	-	1,40	1,13	0,78	0,85	1,87	2,10
1586,11	11,4	0,81	0,35	1,82	2,39	0,87	-	1,63	1,41	1,06	1,13	2,14	2,50
1635,41	11,4	0,77	0,35	1,87	2,55	0,37	-	0,92	0,69	0,34	0,41	1,48	1,70
1684,29	-	0,88	-	1,79	2,33	0,24	-	1,07	0,85	0,85	0,85	1,97	2,16
1732,68	-	0,73	-	1,74	2,18	0,15	-	0,96	0,75	0,75	0,75	1,63	1,70
1782,75	-	0,65	-	1,74	1,91	-	0,10	0,89	0,56	0,56	0,56	1,20	1,50
1830,41	-	0,80	-	0,94	1,14	0,04	-	1,22	1,11	1,11	1,11	1,95	2,10
1879,20	-	0,70	-	1,56	1,79	-	0,02	0,92	0,70	0,70	0,70	1,40	1,55
1928,08	-	0,77	-	1,47	1,91	0,20	-	0,99	0,81	0,81	0,81	1,78	1,85
1975,03	-	0,71	-	1,31	2,03	0,50	-	1,54	1,38	1,38	1,38	2,59	2,53
2024,05	-	0,73	-	2,04	2,39	0,01	-	1,12	0,87	0,87	0,87	1,61	1,75
2074,14	-	0,55	-	1,09	1,27	0,00	-	0,82	0,69	0,69	0,69	1,24	1,40
2122,54	-	0,65	-	1,07	1,33	0,08	-	0,94	0,81	0,81	0,81	1,54	1,50

Tableau A.2.33

Profondeur (m de glace)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/ Na
23,0	171,3	20,5	6,5	0,8	5,13	0,95	293,0	33	67	1,7
35,6	219,0	26,0	8,5	9,5	6,4	1,3	395,0	37	123	1,8
47,7	139,2	17,0	5,4	0,8	4,3	1,9	303,0	37	59	2,2
60,0	399,0	49,0	16,0	1,5	12,0	0,8	710,0	23	145	1,8
73,7	207,3	25,0	8,0	0,4	6,7	0,7	390,0	16	51	1,9
85,0	225,8	27,0	8,2	3,6	10,0	1,8	403,0	50	115	1,8
95,0	22,4	-	-	0,4	0,8	1,1	38,6	35	21	1,7
107,7	147	-	-	0,7	4,4	1,7	274,0	40	71	1,9
121,0	60,3	-	-	0,8	1,4	1,6	103,0	38	44	1,7
132,0	60,8	-	-	0,6	1,4	1,2	97,0	35	32	1,6
137,0	34,7	-	-	0,7	0,8	1,2	56,0	32	23	1,6
143,0	43,9	-	-	0,7	2,2	1,0	76,6	28	25	1,7
148,0	36,8	-	-	1,2	1,6	1,3	68,0	31	16	1,8
155,0	26,7	-	-	0,9	1,6	1,7	49,7	57	40	1,9
163,0	34,1	-	-	0,4	0,6	1,6	56,0	46	25	1,6
172,0	23,3	-	-	0,7	1,2	1,3	43,0	37	15	1,8
177,0	34,2	-	-	1,2	2,0	1,8	55,5	52	45	1,6
182,0	20,4	-	-	0,6	0,9	1,6	36,2	44	25	1,8
185,0	25,9	2,9	0,6	1,6	1,2	1,9	44,1	54	38	1,7

Tableau A.2.34

Profondeur (m de glace)	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na
193,0	23,1	-	-	1,4	1,6	1,4	37,6	38	34	1,6
196,7	10,6	-	-	1,1	0,9	1,8	18,1	36	33	1,7
204,0	13,5	1,4	0,6	0,8	0,9	1,6	20,0	41	34	1,5
206,0	11,8	-	-	1,0	0,8	1,5	18,6	39	31	1,6
208,0	11,4	-	-	1,6	0,9	1,8	14,3	54	45	1,25
211,5	39,2	6,5	6,5	0,8	2,0	1,9	69,6	50	78	1,8
220,0	27,8	3,9	3,7	0,6	1,5	1,9	53,0	38	79	1,9
228	25,6	4,0	3,4	0,9	1,5	2,8	51,6	50	67	2,0
236	43,2	7,0	6,5	1,2	3,0	2,2	85,0	55	90	2,0
239	30,4	4,3	4,0	0,6	1,5	2,5	59,5	36	71	2,0
245	37,5	6,2	7,0	1,0	1,8	2,2	82,7	70	69	2,2
255	9,4	-	-	0,8	0,5	1,6	14,9	49	31	1,6
259	9,5	1,2	0,6	0,6	0,5	1,7	18,4	42	47	1,9
265	7,4	-	-	1,0	0,5	1,9	13,0	47	48	1,8
269	11,8	1,0	0,6	0,7	1,0	1,8	21,0	48	38	1,8
275	13,3	-	-	0,7	1,0	1,3	23,0	34	21	1,7
279	12,3	-	-	0,8	0,8	1,8	20,0	44	45	1,6
290	33,2	4,5	4,5	1,3	1,5	2,3	66,9	57	72	2,0
298	20,9	3,5	3,3	0,6	1,0	1,9	42,3	34	77	2,0

Tableau A.2.34

Profondeur (m de glace)	Na ⁺	Na _m ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	ΔC	ΔC ₁	ΔC ₂	Σ	A1
23,0	7,45	7,45	1,71	0,33	0,04	0,13	0,95	8,25	0,53	1,40	+0,4	+0,4	+0,4	20,8	-
35,6	9,52	9,52	2,17	0,43	0,53	0,16	1,33	11,25	0,60	2,55	-0,3	-0,3	-0,3	28,5	-
47,7	6,06	6,06	1,42	0,27	0,04	0,11	1,93	8,53	0,59	1,22	-0,5	-0,5	-0,5	20,2	-
60,0	17,35	17,35	4,08	0,80	0,08	0,31	0,76	20,00	0,37	3,02	0,0	0,0	0,0	46,8	-
73,7	9,01	9,01	2,08	0,40	0,02	0,17	0,70	11,00	0,25	1,07	+0,1	+0,1	+0,1	24,7	-
85,0	9,82	9,82	2,25	0,41	0,20	0,26	1,82	11,35	0,80	2,40	+0,2	+0,2	+0,2	29,3	-
95,0	0,97	0,97	(0,22)	(0,04)	0,02	0,02	1,13	1,09	0,56	0,43	+0,3	+0,3	+0,3	4,5	-
107,7	6,39	6,39	(1,47)	(0,28)	0,04	0,11	1,70	7,72	0,65	1,48	+0,1	+0,1	+0,1	19,8	-
121,0	2,62	2,62	(0,60)	(0,11)	0,04	0,03	1,63	2,90	0,61	0,91	+0,6	+0,6	+0,6	9,5	-
132,0	2,64	2,64	(0,61)	(0,12)	0,03	0,03	1,20	2,73	0,57	0,66	+0,7	+0,7	+0,7	8,6	-
137,0	1,51	1,51	(0,35)	(0,07)	0,04	0,02	1,17	1,58	0,52	0,47	+0,6	+0,6	+0,6	5,7	-
143,0	1,91	1,91	(0,44)	(0,08)	0,04	0,06	1,04	2,16	0,45	0,51	+0,4	+0,4	+0,4	6,7	-
148,0	1,60	1,60	(0,37)	(0,07)	0,07	0,04	1,25	1,92	0,50	0,32	+0,6	+0,6	+0,6	6,1	-
155,0	1,16	1,16	(0,27)	(0,05)	0,05	0,04	1,70	1,40	0,91	0,83	+0,1	+0,1	+0,1	6,4	-
163,0	1,48	1,48	(0,34)	(0,07)	0,02	0,N2	1,62	1,58	0,74	0,51	+0,7	+0,7	+0,7	6,4	-
172,0	1,01	1,01	(0,23)	(0,04)	0,04	0,03	1,25	1,21	0,60	0,31	+0,5	+0,5	+0,5	4,7	-
177,0	1,49	1,49	(0,34)	(0,06)	0,07	0,05	1,82	1,56	0,85	0,94	+0,5	+0,5	+0,5	7,2	-
182,0	0,89	0,89	(0,20)	(0,04)	0,03	0,02	1,58	1,02	0,71	0,53	+0,5	+0,5	+0,5	5,0	-
185,0	1,13	1,13	0,26	0,05	0,09	0,03	1,89	1,24	0,88	0,79	+0,5	+0,5	+0,5	6,4	-

Tableau A.2.35

Profondeur (m de glace)	Na ⁺	Na _m ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc	Δc ₁	Δc ₂	Σ	Al
193	1,00	1,00	(0,23)	(0,04)	0,08	0,04	1,41	1,06	0,62	0,71	+0,4	+0,4	+0,4	5,2	-
196,7	0,46	0,46	(0,11)	(0,02)	0,06	0,02	1,84	0,51	0,59	0,69	+0,7	+0,7	+0,7	4,3	-
204	0,59	0,59	0,14	0,03	0,04	0,02	1,56	1,56	0,66	0,70	+0,5	+0,5	+0,5	4,3	-
206	0,51	0,51	(0,12)	(0,02)	0,06	0,02	1,50	0,52	0,62	0,64	+0,4	+0,4	+0,4	4,0	-
208	0,50	0,50	(0,12)	(6,02)	0,09	0,02	1,82	0,40	0,88	0,94	+0,3	+0,3	+0,3	4,8	-
211,5	1,71	1,60	0,54	0,33	0,04	0,05	1,88	1,96	0,80	1,63	-0,3	-0,4	+0,1	8,8	10
220	1,21	1,10	0,33	0,19	0,03	0,04	1,90	1,49	0,62	1,64	-0,3	-0,4	-0,1	7,3	10
228	1,11	1,00	0,33	0,17	0,05	0,04	2,25	1,45	0,81	1,40	0,0	-0,1	+0,2	7,5	10
236	1,88	1,76	0,58	0,33	0,06	0,08	2,20	2,39	0,89	1,87	-0,5	-0,6	-0,1	10,2	10
239	1,32	1,20	0,36	0,20	0,03	0,04	2,51	1,68	0,58	1,46	+0,5	+0,4	+0,6	8,1	10
245	1,63	1,41	0,52	0,35	0,06	0,05	2,21	2,33	1,14	1,43	-0,6	-0,8	-0,2	9,5	10
255	0,41	0,41	(0,09)	(0,02)	0,04	0,01	1,64	0,42	0,79	0,65	+0,3	+0,3	+0,3	4,1	-
259	0,41	0,41	0,10	0,03	0,03	0,01	1,70	0,52	0,68	0,99	+0,1	+0,1	+0,1	4,5	-
265	0,32	0,32	(0,07)	(0,01)	0,06	0,01	1,88	0,37	0,75	1,00	+0,2	+0,2	+0,2	5,5	-
269	0,51	0,51	0,08	0,03	0,04	0,03	1,76	0,59	0,78	0,79	+0,3	+0,3	+0,3	4,6	-
275	0,58	0,58	(0,13)	(0,03)	0,04	0,03	1,31	0,65	0,56	0,45	+0,4	+0,4	+0,4	3,8	-
279	0,54	0,54	(0,12)	(0,03)	0,04	0,02	1,81	0,56	0,71	0,93	+0,4	+0,4	+0,4	4,8	-
290	1,44	1,38	0,38	0,23	0,07	0,04	2,32	1,88	0,92	1,50	-0,1	-0,1	+0,1	8,7	5
298	0,91	0,85	0,29	0,17	0,03	0,03	1,89	1,19	0,55	1,61	-0,3	-0,3	-0,1	6,6	5

Profondeur (m)	Al	NO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺ ex.	Mg ⁺⁺ ex.	Na ⁺ m	Cl ⁻	Cl ⁻ ex.	Na ⁺ ex.	SO ₄ ⁻⁻	SO ₄ ⁻⁻ ex (a)	SO ₄ ⁻⁻ ex (b)	SO ₄ ^{--★} ex	H ⁺ cal- culée	H ⁺
23,0	-	0,53	-	-	7,45	8,25	-	0,37	1,40	0,04	0,04	0,04	0,57	0,95
35,6	-	0,60	-	-	9,52	11,25	0,15	-	2,55	1,40	1,40	1,40	2,15	1,33
47,7	-	0,59	-	-	6,06	8,53	1,46	-	1,22	0,49	0,49	0,49	2,53	1,93
60,0	-	0,37	-	-	17,35	20,00	-	0,20	3,02	0,64	0,64	0,64	1,00	0,76
73,7	-	0,25	-	-	9,01	11,00	0,49	-	1,07	0,00	0,00	0,00	0,74	0,70
85,0	-	0,80	-	-	9,82	11,35	-	0,09	2,40	1,08	1,08	1,08	1,88	1,82
95,0	-	0,56	-	-	0,97	1,09	-	0,04	0,43	0,27	0,27	0,27	0,83	1,13
107,7	-	0,65	-	-	6,39	7,72	0,27	-	1,48	0,71	0,71	0,71	1,63	1,70
121,0	-	0,61	-	-	2,62	2,90	-	0,13	0,91	0,43	0,43	0,43	1,04	1,63
132,0	-	0,57	-	-	2,64	2,73	-	0,30	0,66	0,00	0,00	0,00	0,57	1,20
137,0	-	0,52	-	-	1,51	1,58	-	0,15	0,47	0,10	0,10	0,10	0,62	1,17
143,0	-	0,45	-	-	1,91	2,16	-	0,06	0,51	0,21	0,21	0,21	0,66	1,04
148,0	-	0,50	-	-	1,60	1,92	0,05	-	0,32	0,13	0,13	0,13	0,68	1,25
155,0	-	0,91	-	-	1,16	1,40	0,05	-	0,83	0,69	0,69	0,69	1,65	1,70
163,0	-	0,74	-	-	1,48	1,58	-	0,12	0,51	0,18	0,18	0,18	0,92	1,62
172,0	-	0,60	-	-	1,01	1,21	0,03	-	0,31	0,19	0,19	0,19	0,82	1,25
177,0	-	0,85	-	-	1,49	1,56	-	0,15	0,94	0,58	0,58	0,58	1,43	1,82
182,0	-	0,71	-	-	0,89	1,02	-	0,02	0,53	0,40	0,40	0,40	1,11	1,58
185,0	-	0,88	-	-	1,13	1,24	-	0,07	0,79	0,57	0,57	0,57	1,45	1,89

Tableau A.2.36

Profondeur (m)	Al	NO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺ _{ex.}	Mg ⁺⁺ _{ex.}	Na ⁺ _m	Cl ⁻	Cl ⁻ _{ex.}	Na ⁺ _{ex}	SO ₄ ⁻⁻	SO ₄ ⁻⁻ _{ex (a)}	SO ₄ ⁻⁻ _{ex (b)}	SO ₄ ⁻⁻ ★ _{ex}	H ⁺ calculée	H ⁺
193	-	0,62	-	-	1,00	1,06	-	0,09	0,71	0,48	0,48	0,48	1,10	1,41
196,7	-	0,59	-	-	0,46	0,51	-	0,02	0,69	0,61	0,61	0,61	1,20	1,84
204	-	0,66	-	-	0,59	0,56	-	0,11	0,70	0,50	0,50	0,50	1,16	1,56
206	-	0,62	-	-	0,51	0,52	-	0,06	0,64	0,50	0,50	0,50	1,12	1,50
208	-	0,88	-	-	0,50	0,40	-	0,16	0,94	0,70	0,70	0,70	1,58	1,82
211,5	10	0,80	0,26	0,17	1,60	1,96	0,09	-	1,63	1,44	1,00	1,06	1,89	1,88
220	10	0,62	0,14	0,08	1,10	1,49	0,21	-	1,64	1,51	1,29	1,35	2,12	1,90
228	10	0,81	0,13	0,10	1,00	1,45	0,28	-	1,40	1,28	1,05	1,11	2,14	2,25
236	10	0,89	0,25	0,18	1,76	2,39	0,34	-	1,87	1,66	1,23	1,29	2,46	2,20
239	10	0,58	0,15	0,08	1,20	1,68	0,28	-	1,46	1,31	1,08	1,14	1,94	2,51
245	10	1,14	0,29	0,20	1,41	2,33	0,68	-	1,43	1,26	0,77	0,83	2,59	2,31
255	-	0,79	-	-	0,41	0,42	-	0,05	0,65	0,54	0,54	0,54	1,33	1,64
259	-	0,68	-	-	0,41	0,52	0,04	-	0,99	0,94	0,94	0,94	1,66	1,70
265	-	0,75	-	-	0,32	0,37	-	0,00	1,00	0,96	0,96	0,96	1,71	1,88
269	-	0,78	-	-	0,51	0,59	-	0,00	0,79	0,72	0,72	0,72	1,50	1,76
275	-	0,56	-	-	0,58	0,65	-	0,02	0,45	0,35	0,35	0,35	0,91	1,31
279	-	0,71	-	-	0,54	0,56	-	0,06	0,93	0,79	0,79	0,79	1,50	1,81
290	5	0,92	0,17	0,06	1,38	1,88	0,27	-	1,50	1,33	1,10	1,13	2,29	2,32
298	5	0,55	0,13	0,09	0,85	1,19	0,20	-	1,63	1,53	1,31	1,34	2,06	1,89

Tableau A.2.36

Profondeur (m de glace)	Al	Na ⁺	Na _T	Na _m ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na _m ⁺	K/Na _m ⁺	Mg ⁺⁺ /Na _m ⁺
5,9	-	30,4	-	30,4	-	-	0,5	0,8	1,1	22,7	17	66	0,7	0,026	-
71,4	-	16,2	-	16,2	-	-	1,0	0,5	1,2	9,7	14	68	0,6	0,031	-
82,3	-	24,6	-	24,6	-	-	0,8	0,6	1,3	18,8	17	66	0,8	0,024	-
121,2	-	20,1	-	20,1	-	-	0,8	1,0	1,4	13,3	16	66	0,7	0,050	-
165,3	-	17,7	-	17,7	-	-	0,5	0,5	1,8	9,5	15	84	0,5	0,028	-
183,5	-	19,5	-	19,5	-	-	0,6	0,7	1,7	15,7	15	88	0,8	0,036	-
215,3	-	14,4	-	14,4	-	-	1,1	0,6	2,3	34,0	14	81	2,4	0,042	-
232,8	-	15,5	-	15,5	-	-	0,8	0,7	2,4	52,3	11	65	3,4	0,045	-
270,8	2,6	17,1	17,1	16,4	-	-	0,5	0,6	3,1	43,3	15	98	2,6	0,037	-
291,9	-	10,7	-	10,7	-	-	0,5	0,3	2,5	29,5	18	70	2,8	0,028	-
297,5	1,3	10,3	9,9	9,7	-	-	1,5	0,5	2,7	29,1	19	80	3,0	0,051	-
325,5	1,0	5,2	4,8	4,7	-	-	0,4	0,1	2,0	22,2	23	53	4,7	0,021	-
338,9	2,3	12,7	11,6	11,5	-	-	0,9	0,6	2,6	29,2	20	87	2,5	0,052	-
345,9	-	13,6	-	13,6	-	-	0,7	0,5	2,9	34,6	45	88	2,5	0,037	-
360,2	1,9	6,8	6,7	6,2	-	-	1,0	0,2	2,6	25,9	29	80	4,2	0,032	-
382,6	-	18,0	-	18,0	2,4	0,5	0,8	0,8	4,9	6,7	5	250	0,4	0,044	0,133
386,1	2,2	41,0	40,4	40,0	-	-	0,5	1,4	1,8	12,9	12	145	0,3	0,035	-

Tableau A.2.37

Profondeur (m de glace)	Al	Na ⁺	Na _T	Na _m ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl/Na _m ⁺	K ⁺ /Na _m ⁺	Mg ⁺⁺ /Na _m ⁺
399,4	5,5	44,1	39,4	40,2	4,0	5,0	2,3	1,5	1,0	16,4	14	108	0,4	0,037	0,100
417,8	3,2	31,7	30,0	29,9	3,4	1,0	0,8	0,9	1,6	18,0	10	127	0,6	0,030	0,114
419,8	7,0	44,1	39,8	39,9	4,8	1,0	0,5	1,0	1,2	17,9	13	114	0,4	0,025	0,120
439,5	4,2	43,6	37,8	39,5	4,0	1,0	0,9	1,1	1,3	26,6	10	106	0,7	0,028	0,101
454,2	6,2	43,2	42,0	40,8	6,0	4,5	0,5	1,0	1,1	34,0	9	121	0,8	0,025	0,147
463,8	8,3	69,8	60,8	62,9	8,5	5,0	1,0	2,4	2,1	83,4	13	125	1,3	0,038	0,135
488,4	26,1	70,4	69,7	62,6	10,3	12,5	1,3	3,7	1,9	97,5	26	132	1,6	0,059	0,165
490,8	31,8	70,8	74,4	63,5	13,0	22,0	1,0	3,0	1,6	120,0	26	133	1,9	0,047	0,205
510,4	79,0	127,2	124,7	103,3	23,5	40,5	1,2	6,6	2,5	177,0	44	263	1,7	0,064	0,227
520,4	71,9	100,8	105,0	82,3	17,0	32,0	1,1	6,6	2,0	175,0	40	160	2,1	0,080	0,207
543,2	150,0	111,0	126,0	75,5	22,0	70,0	1,2	7,6	2,2	183,0	81	250	2,4	0,101	0,291
545,9	87,3	109,2	102,0	80,6	17,0	34,5	4,1	6,9	2,1	164,0	33	161	2,0	0,086	0,211
560,9	68,1	106,0	103,0	85,0	16,3	34,0	1,5	6,3	2,4	172,0	40	164	2,0	0,074	0,192
584,1	55,6	92,5	92,0	76,1	11,8	23,0	3,5	5,8	1,4	129,0	47	130	1,7	0,076	0,155
597,0	111,0	169,8	171,0	138,4	30,0	57,0	1,5	8,1	2,3	209,0	63	340	1,5	0,059	0,217
598,2	96,5	130,0	125,0	99,8	21,5	53,0	1,9	7,7	1,8	205,6	32	201	2,1	0,077	0,215
608,4	104,0	130,0	135,0	102,7	20,0	54,0	3,0	7,5	1,9	207,0	51	214	2,0	0,073	0,195
617,3	103,0	122,2	128	96,5	21,0	47,5	4,7	7,2	1,9	194,0	44	217	2,0	0,075	0,218

Tableau A.2.37

Profondeur (m de glace)	Al	Na ⁺	Na _T	Na _m ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl _{Na_m} ⁺	K _{Na_m} ⁺	Mg ⁺⁺ / Na _m ⁺
632,8	49,2	107,4	105,0	92,1	19,4	34,0	1,0	4,7	1,8	160,0	31	195	1,7	0,051	0,211
639,6	41,1	90,3	88,6	77,7	13,5	22,5	1,9	5,2	1,3	87,0	34	170	1,2	0,067	0,174
648,9	61,2	96,6	99,4	80,5	14,7	30,0	2,4	5,8	2,1	164,0	33	166	2,0	0,072	0,183
649,9	43,3	61,2	62,0	49,3	11,7	23,0	0,8	4,1	1,8	96,6	29	148	2,0	0,083	0,237
668,7	50,8	119,7	109,0	99,8	18,0	38,0	2,2	6,1	2,1	184,0	24	187	1,8	0,061	0,180
680,9	29,2	83,7	83,9	75,4	14,0	20,2	1,2	3,0	0,8	129,0	16	126	1,7	0,040	0,186
689,1	43,7	100,1	93,6	84,3	13,4	25,0	1,5	5,2	1,7	149,4	23	155	1,8	0,120	0,159
705,1	24,0	95,1	105,0	93,1	13,7	17,5	1,0	3,3	0,7	103,0	14	186	1,1	0,035	0,147
718,5	13,8	65,8	57,6	57,7	9,3	6,0	1,9	3,3	1,4	64,0	16	132	1,1	0,057	0,161
733,9	35,1	84,6	88,7	76,6	13,5	20,5	1,2	2,8	1,5	123,0	9	164	1,6	0,037	0,176
749,2	14,0	81,2	69,7	71,4	10,3	6,5	0,7	3,5	1,0	74,8	15	119	1,0	0,049	0,144
768,9	6,7	74,7	64,8	67,8	9,35	3,5	0,8	2,4	0,3	53,1	15	130	0,8	0,035	0,138
772,0	13,5	61,0	56,6	54,9	6,3	4,5	0,7	3,3	0,9	45,1	17	100	0,8	0,060	0,115
793,5	60,1	124,0	119,0	104,2	16,5	30,5	2,2	6,9	1,7	171,0	22	190	1,6	0,066	0,158
793,9	-	68,8	-	-	13,7	26,5	0,8	3,1	1,9	110,0	12	184	-	-	-
817,9	21,5	96,0	82,2	82,9	11,4	12,5	0,9	5,0	1,1	83,0	21	176	1,0	0,060	0,138
833,9	-	85,2	-	13,0	14,8	14,8	1,2	2,0	1,7	84,0	19	168	-	-	-
841,4	20,0	108,0	103,0	99,8	14,0	10,0	1,9	4,6	1,8	142,0	20	164	1,4	0,046	0,140
858,2	5,4	54,6	47,1	49,3	5,4	1,8	1,3	2,9	1,6	23,7	14	145	0,5	0,059	0,109

Tableau A.2.37

Profondeur (m de glace)	Na ⁺ _m	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc ₁	Δc ₂	Σ	Δc
5,9	1,32	0,30	-	0,03	0,02	1,12	0,64	0,28	1,38	+0,5	+0,5		+0,5
71,4	0,70	0,16	-	0,06	0,01	1,24	0,27	0,22	1,42	+0,3	+0,3	4,1	+0,3
82,3	1,07	0,25	-	0,04	0,02	1,29	0,53	0,27	1,38	+0,5	+0,5	4,9	+0,5
121,2	0,87	0,20	-	0,04	0,03	1,35	0,37	0,26	1,38	+0,5	+0,5	4,5	+0,5
165,3	0,77	0,18	-	0,03	0,01	1,81	0,27	0,24	1,75	+0,5	+0,5	5,1	+0,5
183,5	0,85	0,19	-	0,03	0,02	1,69	0,44	0,25	1,83	+0,3	+0,3	5,3	+0,3
215,3	0,63	0,14	-	0,06	0,02	2,31	0,96	0,23	1,69	+0,3	+0,3	6,0	+0,3
238,2	0,67	0,15	-	0,04	0,02	2,36	1,47	0,18	1,36	+0,2	+0,2	6,2	+0,2
270,8	0,72	0,16	-	0,03	0,02	3,06	1,22	0,24	2,04	+0,5	+0,5	7,5	+0,5
291,9	0,46	0,11	-	0,03	0,01	2,52	0,83	0,29	1,46	+0,5	+0,5	5,7	+0,5
297,5	0,42	0,10	-	0,08	0,01	2,70	0,82	0,30	1,67	+0,5	+0,5	6,1	0,5
325,5	0,20	0,05	-	0,02	0,00	2,04	0,63	0,37	1,10	+0,2	+0,2	4,4	+0,2
338,9	0,50	0,12	-	0,05	0,01	2,62	0,82	0,31	1,81	+0,4	+0,4	6,2	+0,4
345,9	0,59	0,14	-	0,04	0,01	2,92	0,97	0,72	1,83	+0,2	+0,2	7,2	+0,2
360,2	0,27	0,06	-	0,06	0,01	2,60	0,73	0,47	1,67	+0,1	+0,1	5,9	+0,1
382,6	0,78	0,24	-	0,04	0,02	4,94	0,19	0,09	5,21	+0,5	+0,5	11,5	+0,5
386,1	1,74	0,40	-	0,03	0,04	1,82	0,36	0,19	3,02	+0,5	+0,5	7,6	+0,5

Tableau A.2.38

Profondeur (m de glace)	Na ⁺ m	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc ₁	Δc ₂	Σ	Δc
399,4	1,75	0,33	0,25	0,13	0,04	1,01	0,46	0,23	2,25	+0,5	+0,6	6,5	+0,6
417,8	1,30	0,28	0,05	0,04	0,02	1,59	0,51	0,16	2,65	0,0	+0,0	6,6	+0,0
419,8	1,73	0,40	0,05	0,03	0,03	1,24	0,50	0,20	2,38	+0,4	+0,4	6,6	+0,6
439,5	1,72	0,33	0,05	0,05	0,03	1,32	0,75	0,17	2,21	+0,4	+0,4	6,6	+0,6
454,2	1,77	0,50	0,23	0,03	0,03	1,05	0,96	0,15	2,52	-0,3	0,0	7,2	-0,2
463,8	2,73	0,71	0,25	0,06	0,06	2,06	2,35	0,20	2,60	+0,5	+0,7	11,0	+0,8
488,4	2,72	0,86	0,63	0,07	0,09	1,88	2,75	0,42	2,75	-0,4	+0,3	12,2	-0,1
490,8	2,76	1,08	1,10	0,06	0,08	1,60	3,38	0,41	2,77	-1,3	+0,1	13,2	-1,0
510,4	4,49	1,96	2,03	0,07	0,17	2,51	4,99	0,72	5,48	-2,7	0,0	22,4	-1,7
520,4	3,58	1,42	1,60	0,06	0,17	1,97	4,93	0,65	3,33	-2,2	-0,1	17,7	-1,3
543,2	3,28	1,83	3,50	0,07	0,19	2,20	5,15	1,30	5,21	-5,0	-0,6	22,7	-3,3
545,9	3,50	1,42	1,73	0,23	0,18	2,05	4,62	0,53	3,35	-1,6	+0,6	17,6	-0,2
560,9	3,70	1,36	1,70	0,08	0,16	2,38	4,85	0,64	3,42	-1,6	+0,5	18,3	-0,6
584,1	3,31	0,98	1,15	0,19	0,15	1,40	3,43	0,76	2,71	-1,1	+0,1	14,3	-0,4
597,0	6,02	2,50	2,85	0,08	0,21	2,27	5,89	1,01	7,08	-3,8	0,0	27,9	-2,3
598,2	4,34	1,79	2,65	0,11	0,20	1,82	5,79	0,51	4,19	-2,8	+0,4	21,4	-1,4
608,4	4,47	1,67	2,35	0,17	0,19	1,90	5,83	0,82	4,46	-3,2	-0,3	21,9	-1,9
617,3	4,19	1,75	2,07	0,26	0,18	1,92	5,46	0,71	4,52	-3,0	-0,3	21,1	-1,8

Tableau A.2.38

Profondeur (m de glace)	Na ⁺ _m	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Δc ₁	Δc ₂	Σ	Δc
632,8	4,00	1,62	1,70	0,06	0,12	1,83	4,51	0,50	4,06	-2,0	+0,3	18,4	-1,3
639,6	3,38	1,13	1,13	0,11	0,13	1,32	2,73	0,55	3,54	-1,0	-0,6	13,0	-0,4
648,9	3,50	1,23	1,50	0,13	0,15	2,13	4,62	0,53	3,46	-1,7	+0,1	17,3	-0,1
649,9	2,14	0,98	1,15	0,04	0,11	1,84	2,72	0,47	3,08	-1,6	0,0	12,5	-1,0
668,7	4,34	1,50	1,90	0,12	0,16	2,15	5,18	0,39	3,90	-1,5	+0,7	19,6	-0,6
680,9	3,28	1,17	1,01	0,07	0,08	0,80	3,63	0,26	2,63	-1,4	-0,1	12,9	-1,1
689,1	3,67	1,12	1,25	0,08	0,13	1,70	4,21	0,37	3,23	-1,2	+0,1	15,8	-0,5
705,1	4,05	1,14	0,88	0,06	0,08	0,74	2,90	0,23	3,88	-1,0	-0,1	14,0	-1,0
718,5	2,51	0,78	0,30	0,11	0,08	1,42	1,80	0,26	2,75	0,0	+0,4	10,0	+0,3
733,9	3,33	1,13	1,03	0,07	0,07	1,47	3,46	0,15	3,42	-1,2	+0,1	14,1	-0,9
749,2	3,10	0,86	0,33	0,04	0,09	1,04	2,11	0,24	2,48	+0,3	+0,6	10,3	+0,7
768,9	2,95	0,78	0,18	0,04	0,06	0,34	1,50	0,24	2,71	-0,3	-0,1	8,8	-0,0
772,0	2,39	0,53	0,23	0,04	0,08	0,92	1,27	0,27	2,08	+0,5	+0,6	7,8	+0,7
793,5	4,53	1,38	1,53	0,12	0,18	1,74	4,82	0,35	3,96	-1,3	+0,3	18,6	-0,5
793,9	-	1,14	1,33	0,04	0,08	1,87	3,10	0,19	3,83	-	-	-	-1,5
817,9	3,60	0,95	0,63	0,05	0,13	1,14	2,34	0,34	3,67	-0,4	+0,2	12,9	+0,1
833,9	-	1,08	0,74	0,07	0,07	1,67	2,37	0,31	3,50	-	-	-	+0,2
841,4	4,34	1,17	0,50	0,11	0,12	1,81	4,00	0,32	3,42	-0,2	+0,3	15,8	+0,1
858,2	2,14	0,45	0,09	0,07	0,07	1,56	0,67	0,23	3,02	+0,5	+0,5	8,3	+0,7

Tableau A.2.38

Profondeur (m)	Na ⁺	Ca ⁺⁺ _{ex}	Mg ⁺⁺ _{ex}	Cl ⁻	Cl ⁻ _{ex}	Na ⁺ _{ex}	SO ₄ ⁻⁻	SO ₄ ⁻⁻ _{ex} (a)	SO ₄ ⁻⁻ _{ex} (b)	SO ₄ ⁻⁻ ★ _{ex}	H ⁺ calculée
5,9	1,32	-	-	0,64	-	0,77	1,38	0,32	0,32	0,32	0,6
71,4	0,70	-	-	0,27	-	0,47	1,42	0,79	0,79	0,79	1,0
82,3	1,07	-	-	0,53	-	0,62	1,38	0,53	0,53	0,53	0,8
121,2	0,87	-	-	0,37	-	0,55	1,38	0,63	0,63	0,63	0,9
165,3	0,77	-	-	0,27	-	0,54	1,75	1,03	1,03	1,03	1,3
183,5	0,85	-	-	0,44	-	0,47	1,83	1,17	1,17	1,17	1,4
215,3	0,63	-	-	0,96	0,23	-	1,69	1,61	1,61	1,61	2,1
238,2	0,67	-	-	1,47	0,69	-	1,35	1,27	1,27	1,27	2,1
270,8	0,72	-	-	1,22	0,38	-	2,04	1,95	1,95	1,95	2,6
291,9	0,46	-	-	0,83	0,29	-	1,46	1,40	1,40	1,40	2,0
297,5	0,42	-	-	0,82	0,33	-	1,67	1,62	1,62	1,62	2,3
325,5	0,20	-	-	0,63	0,40	-	1,10	1,08	1,08	1,08	1,85
338,9	0,50	-	-	0,82	0,24	-	1,81	1,75	1,75	1,75	2,3
345,9	0,59	-	-	0,97	0,28	-	1,83	1,76	1,76	1,76	2,8
360,2	0,27	-	-	0,73	0,42	-	1,67	1,64	1,64	1,64	2,5
382,6	0,78	-	-	0,19	-	0,62	5,21	4,39	4,39	4,39	4,5
386,1	1,74	-	-	0,36	-	1,43	3,02	1,14	1,14	1,14	1,3
399,4	1,75	0,17	0,00	0,46	-	1,36	2,25	0,45	0,28	0,32	0,6
417,8	1,30	0,00	0,00	0,51	-	0,86	2,65	1,48	1,48	1,48	1,6
419,8	1,73	0,00	0,00	0,50	-	1,30	2,38	0,65	0,65	0,65	0,85
439,5	1,72	0,00	0,00	0,75	-	1,08	2,21	0,74	0,74	0,74	0,9
454,2	1,77	0,15	0,10	0,96	-	0,95	2,52	1,20	0,95	0,99	1,1
463,8	2,73	0,13	0,09	2,35	-	0,71	2,60	1,43	1,21	1,26	1,4
488,4	2,72	0,51	0,23	2,75	-	0,36	2,75	1,99	1,25	1,42	1,7
490,8	2,76	0,98	0,44	3,38	0,16	-	2,77	2,44	1,02	1,23	1,6
510,4	4,49	1,83	0,93	4,99	-	0,21	5,48	4,68	1,92	2,43	2,6

Tableau A.2.39

Profondeur (m)	Na ⁺ _m	Ca ⁺⁺ _{ex}	Mg ⁺⁺ _{ex}	Cl ⁻	Cl ⁻	Na ⁺ _{ex}	SO ⁻⁻	SO ⁻⁻ _{4ex} (a)	SO ⁻⁻ _{4ex} (b)	SO ⁻⁻ _{4ex} [★]	H ⁺ calculée
520,4	3,58	1,44	0,60	4,93	0,76	-	3,33	2,90	0,86	1,32	2,3
543,2	3,28	3,36	1,08	5,15	1,32	-	5,21	4,81	0,37	1,34	3,0
545,9	3,50	1,58	0,62	4,62	0,54	-	3,35	2,93	0,73	1,29	1,8
560,9	3,70	1,54	0,51	4,85	0,54	-	3,42	2,97	0,92	1,36	2,1
584,1	3,31	1,00	0,22	3,63	-	0,20	2,71	2,07	0,85	1,21	1,6
597,0	6,02	2,59	1,11	5,89	-	0,97	7,08	5,20	1,50	2,22	2,5
598,2	4,34	2,46	0,79	5,79	0,73	-	4,19	3,66	0,41	1,03	1,65
608,4	4,47	2,15	0,64	5,83	0,62	-	4,46	3,92	1,13	1,80	2,6
617,3	4,19	1,89	0,79	5,46	0,57	-	4,52	4,01	1,33	2,00	2,6
632,8	4,00	1,52	0,70	4,51	-	0,13	4,06	3,41	1,19	1,51	1,7
639,6	3,38	0,98	0,35	2,73	-	1,04	3,54	1,91	0,58	0,84	1,1
648,9	3,50	1,35	0,43	4,62	0,54	-	3,46	3,04	1,26	1,65	2,3
649,9	2,14	1,06	0,49	2,72	0,22	-	3,08	2,82	1,27	1,65	1,95
668,7	4,34	1,71	0,50	5,18	0,12	-	3,90	3,37	1,16	1,49	1,7
680,9	3,28	0,87	0,42	3,63	-	0,17	2,63	2,03	0,74	0,93	1,0
689,1	3,67	1,09	0,28	4,21	-	0,06	3,23	2,71	1,34	1,62	1,17
705,1	4,05	0,70	0,21	2,90	-	1,56	3,88	1,56	0,65	0,80	0,9
718,5	2,51	0,19	0,20	1,80	-	0,97	2,75	1,31	0,92	1,01	1,2
733,9	3,33	0,88	0,36	3,46	-	0,36	3,42	2,58	1,34	1,57	1,5
749,2	3,10	0,19	0,15	2,11	-	1,29	2,48	0,59	0,25	0,34	0,5
768,9	2,95	0,05	0,10	1,50	-	1,66	2,71	0,40	0,25	0,29	0,5
772,0	2,39	0,12	0,00	1,27	-	1,30	2,08	0,27	0,15	0,24	0,4
793,5	4,53	1,33	0,34	4,82	-	0,40	3,96	2,94	1,27	1,68	1,6
817,9	3,60	0,47	0,12	2,34	-	1,59	3,67	1,37	0,78	0,92	1,1
841,4	4,34	0,31	0,17	4,00	-	0,91	3,42	1,82	1,34	1,47	1,7
858,2	2,14	0,00	0,00	0,67	-	1,56	3,02	0,93	0,93	0,96	1,2

Tableau A.2.39

B I B L I O G R A P H I E

ANDREAE M.O. and RAEMDONCK H., 1983

Dimethyl sulfide in the surface ocean and the marine atmosphere : a global view, Science, vol. 221, p. 744-7.

ANDREAE M.O. and BARNARD W.R., 1984

The marine chemistry of dimethylsulfide, Marine Chem., 14, p. 267-279.

ARISTARAIN A.J., 1980

Etude glaciologique de la calotte polaire de l'île de James Ross (Péninsule Antarctique), Thèse de 3e cycle.

ARISTARAIN A.J., DELMAS R.J. and BRIAT M., 1982

Snow chemistry on James Ross Island (Antarctic Peninsula), Journal of Geophysical Research, Vol. 87, N° C13, p. 11004-012.

BARNOLA J.M., 1984

Etude des variations passées du CO₂ atmosphérique à partir de l'analyse de l'air piégé dans la glace ; détermination de la teneur "pré-industrielle", étude de la transition dernier âge glaciaire-Holocène. Thèse de 3e cycle, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, publication sous presse du Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement, 140 p.

BARKOV N.I., KOROTKEVICH E.S., GORDIENKO F.G. and KOTLYAKOV V.M., 1977

The isotope analysis of ice cores from Vostok station (Antarctica), to the depth of 950 m, UGGI International Symposium on Isotopes and Impurities in snow and Ice, Grenoble, August 1975, AIHS Publ. 118, p. 382-87.

BAUER E. and GILMORE F.R., 1975

Effect of atmospheric nuclear explosions on total ozone, Rev. Geophys. Space Phys., Vol. 13, p. 451-58.

BONSANG B., NGUYEN B.C., GAUDRY A. and LAMBERT G., 1980

Sulfate enrichment in marine aerosols owing to biogenic gaseous sulfur compounds, J. Geophys. Res., 85, p. 7410-16.

BORUCKI W.J. and CHAMEIDES W.L., 1984

Lightning : estimates of the rates of energy dissipation and nitrogen fixation, Rev. Geophys. Space Phys., 2, N° 4, p. 363-72.

BOUTRON C., 1978

Influence des aérosols naturels et anthropogéniques sur la géochimie des neiges polaires. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, Publication N° 254 du Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, 283 p.

BOUTRON C., 1979

Reduction of contamination problems in sampling of Antarctic snows for trace elements analysis, Analytica Chimica Acta, 106, p. 127-30.

BOUTRON C. and LORIUS C., 1979

Trace metals in Antarctic snows since 1914, Nature, Vol. 277, N° 5697, p. 551-54.

BOUTRON C., 1981

Nouvelles données sur le contenu en métaux traces des neiges de l'Antarctique, du Groënland et de l'île de Devon. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 17, Heft 1, S. 79-113.

BOUTRON C., 1982

Atmospheric trace metals in the snow layers deposited at the South Pole from 1928 to 1977, Atmospheric Environment, Vol. 16, N° 10, p. 2451-59.

BRIAT M., BOUTRON C. and LORIUS C., 1974

Chlorine and sodium content of East Antarctica firn samples, Journal de Recherches Atmosphériques, Vol. 8, p. 895-901.

BUAT-MENARD P., 1970

Contribution à l'étude géochimique du chlore d'origine marine, Thèse de 3e cycle, Faculté des Sciences de Paris, France.

BUAT-MENARD P., MORELLI J. and CHESSELET R., 1974

Water soluble elements in atmospheric particulate matter over tropical and equatorial Atlantic, Journal of Research Atmospheric, Vol. 8, p. 661-73.

BUSENBERG E. and LANGWAY C.C. Jr., 1979

Levels of ammonium, sulfate, chloride, calcium and sodium in snow and ice from Southern Greenland, Journal of Geoph. Res., VOL. 84, N° C4, p.

CADLE R.D., KIANG C.S. and LOUIS J.F., 1976

The global scale dispersion of the eruption clouds from major volcanic eruptions, Journal of Geophysical Research, Vol. 81, p. 3125-32.

CADLE R.D., 1980

A comparison of volcanic with other fluxes of atmospheric trace gas constituents, Rev. Geophys and Space Phys., 18, p. 746-52.

CALVET J.G., SU. F., BOTTENHEIM J.W. and STRAUSS O.P., 1978

Mechanism of the homogeneous oxidation of sulfur dioxide in the troposphere, Atmospheric Environment, Vol. 12, p. 197-226.

CASTLEMAN A.W., MUNKELWITZ Jr., H.R., MANOWITZ B., 1974

Isotopic studies of the sulfur component of the stratospheric aerosol layer, Tellus, Vol. 26, p. 222-34.

CHAMEIDES W.L., STEDMAN D.H., DICKERSON R.R., RUSCH D.W. and CICERONE R.J., 1977

NO_x production in lightning, Journal of Atmospheric Science, Vol. 34, p. 143-49.

CHESSELET R., MORELLI J., and BUAT-MENARD P., 1972

Variations in ionic ratios between reference sea water and marine aerosol, Journal of Geophysical Research, Vol. 77, p. 5116-31.

CICERONE R.J., 1981

Halogens in the atmosphere, Rev. Geophys. Space Phys., 19, 1, p. 123-139.

CRAGIN J.M., HERRON M.M., LANGWAY C.C. and KLOUDA G., 1977

Interhemispheric comparison of changes in the composition of atmospheric precipitation during the late cenozoic era, in Dunbar, Maxwell (ed.), Polar oceans (Proceedings of the Polar Oceans Conference, Montreal, 1974), Arctic Institute of North America, p. 617-31.

CRUTZEN P.J., ISAKSEN S.A. and REID G.C., 1975

Solar proton events : stratospheric sources of nitric oxide, Science, 189, p. 457-59.

CRUTZEN P.J., 1979

The role of NO and NO₂ in the chemistry of the troposphere and stratosphere, Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 7, p. 443-72.

CRUTZEN P.J., HEIDT L.E., KRASNEC J.P., POLLACK W.H. and SEILER W., 1979

Biomass burning as a source of atmospheric gases CO, H₂, N₂O, NO, CH₃Cl and COS, Nature, Vol. 282, p. 253-56.

CULLIS C.F. and HIRSCHLER M.M., 1980

Atmospheric sulfur : natural and man-made sources, Atmospheric Environment, Vol. 14, p. 1263-78.

CUNNINGHAM W.C. and ZOLLER W.H., 1981

The chemical composition of remote area aerosols, Journal of Aerosol Sciences, Vol. 12, p. 367-84.

DAWSON G.A., 1980

Nitrogen fixation by lightning, Journal of Atmospheric Science, Vol. 37, p. 174-78.

DE ANGELIS M., LEGRAND M., PETIT J.R., BARKOV N.I., KOROTKEVICH Y.S., KOTLYAKOV V.M., 1984

Soluble and insoluble impurities along the 950 m deep Vostok ice core (Antarctica) - Climatic implications - Journal of Atmospheric Chemistry, Vol. 1, p. 215-39.

DELANY A.C., POLLOCK W.H., SHEDLOOSKY J.P., 1973

Tropospheric aerosol : the relative contribution of marine and continental components, Journal of Geophysical Research, Vol. 78, p. 6249-65.

DELMAS R., 1978

Microdosage potentiométrique de l'ion sulfate, Mikrochim. Acta, 1, p. 219-28.

DELMAS R. and BOUTRON C., 1978

Sulfate in antarctic snow : spatio-temporal distribution, Atmospheric Environment, Vol. 12, p. 723-28.

DELMAS R. and BOUTRON C., 1980

Are the past variations of the stratospheric sulfate burden recorded in central Antarctic snow and ice layers ?, Journal of Geophysical Research, Vol. 85, N° C10, p. 5645-49.

DELMAS R.J., ASCENCIO J.M. and LEGRAND M., 1980

Polar ice evidence that atmospheric CO₂ 20,000 yr BP was 50 % of present, Nature, Vol. 284, N° 5752, p. 155-57.

DELMAS R.J., 1982

Antarctic sulphate budget, Nature, Vol. 299, p. 677-78.

DELMAS R.J., BRIAT M. and LEGRAND M., 1982

Chemistry of South polar snow, Journal of Geophysical Research, Vol. 87, N° C6, p. 4314-38.

DELMAS R.J. and GRAVENHORST G., 1982

Background precipitation acidity, Proc. C.E.C. Workshop "Acid deposition", Berlin, 9-10 sept. 1982, p. 82-107.

DELMAS R., BARNOLA J.M. and LEGRAND M., 1982

Gas derived aerosols in central Antarctic snow and ice : the case of sulfuric and nitric acids, Annals of Glaciology, Vol. 3, p. 71-76.

DELMAS R., LEGRAND M., ARISTARAIN A. and ZANOLINI F., 1985

Volcanic deposits in antarctic snow and ice, Journal of Geophysical Research, sous presse.

DEVINE J.D., SIGURDSSON H. and DEVIS A.N., 1984

Estimates of sulfur and chlorine yield to the atmosphere from volcanic eruptions and potential climatic effects, Journal of Geophysical Research, Vol. 89, N° B7, p. 6309-25.

DUCE R.A., 1969

On the source of gaseous chlorine in the marine atmosphere, Journal of Geophysical Research, Vol. 70, p. 1775-99.

DUCE R.A., WINCHESTER J.W. and VAN NAHL T.W., 1965

Iodine, bromine and chlorine in the Hawaiian marine atmosphere, Journal of Geophysical Research, Vol. 70, p. 1775-99.

DUCE R.A., ZOLLER W.H. and MOYERS J.L., 1973

Particulate and gaseous halogens in the Antarctic atmosphere, J. of Geophys. Res., 78, 33, p. 7802-11.

DYER A.J. and HICKS B.B., 1965

Stratospheric transport of volcanic dust inferred from solar radiation measurements, Nature, Vol. 208, p. 131-33.

ERIKSSON E., 1960

The yearly circulation of chloride and sulfur in nature ; meteorological, geochemical and pedological implications, Tellus, Vol. 12, p. 63-109.

FRIEND H.P., 1973

The global sulfur cycle. In Chemistry of the low atmosphere, (S.I. Rasool ed.) Plenum Press, New-York and London, p. 177-201.

GALBALLY I.E. and ROY C.R., 1978

Loss of fixed nitrogen from soils by nitric oxide exhalation, Nature, Vol. 275, p. 734-35.

GIGGENBACH W.F., KYLE P.R., LYON G.L., 1973

Present volcanic activity on Mount Erebus, Ross Island, Antarctica, Geology, I, p. 135-36.

GOODING J.L. and CLANTON U.S., 1983

El Chichon volcanic ash in the stratosphere : particles abundances and size distributions after the 1982 eruption, Geophysical Research Letters, Vol.10, p. 1033-36.

GORDIENKO F.G., KOTLYAKOV V.M., SMIRNOV K.Ye, 1980

Ob izotopnom i khimicheskom sostave snezhnogo pokrova v vostochnoy Antarktide (po issledovaniyam na profile Mirny-Vostok), (On isotope and chemical composition of the snow cover of eastern Antarctica (studies along the profile Mirny-Vostok)), Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy Khronika. Obsuzhdeniya, 38, p. 36-49.

GORDON C.M., JONES E.C. and LARSON R.E., 1977

The vertical distribution of particulate Na and Cl in a marine atmosphere, Journal of Geophysical Research, Vol. 82, p. 988-90.

GOW A.J., de BLANDER F., CROZAZ G. and PICCIOTTO E., 1972

Snow accumulation at "Byrd" Station, Antarctica, Journal of Glaciology, Vol. 11, N° 61, p. 59-64.

GRAEDEL T.E., 1979

The kinetic photochemistry of the marine atmosphere, Journal of Geophysical Research, Vol. 84, N° C1, p. 273-86.

GRAS J.L., 1983

Ammonia and ammonium concentrations in the antarctic atmosphere, Atmospheric Environment, Vol. 17, N° 4, p. 815-18.

GRAVENHORST G., 1978

Maritime sulfate over the North Atlantic, Atmos. Environ., 12, p. 707-13.

GROSJEAN D., 1984

Photooxidation of methyl sulfide, ethyl sulfide and methanethiol, Environ. Sci. Technol., 18, p. 460-68.

HAMEED S. and PAIDOUSSIS O.G., 1981

Implications of natural sources for the latitudinal gradients of NO_x in the unpolluted troposphere, Geophysical Research Letters, Vol. 8, N° 6, p. 591-94.

HAMMER C.U., 1977

Past volcanism revealed by Greenland ice sheet impurities, Nature, Vol. 270, N° 5637, p. 482-86.

HAMMER C.U., 1980

Acidity of polar ice cores in relation to absolute dating, past volcanism, and radio-echoes, Journal of Glaciology, VOL. 25, N° 93, p. 359-71.

HAMMER C.U., CLAUSEN H.B. and DANSGAARD, 1980

Greenland ice sheet evidence of post-glacial volcanism and its climatic impact, Nature, Vol. 288, N° 5788, p. 230-35.

HAYES D., SNETSINGER K., FERRY G., OBERBECK V. and FARLOW N., 1980

Reactivity of stratospheric aerosols to small amounts of ammonia in the laboratory environment, Geophysical Research Letters, Vol. 7, N° 11, p. 974-76.

HERRON M.M. and LANGWAY C.C. Jr., 1979

Dating of Ross Ice Shelf cores by chemical analysis, Journal of Glaciology, Vol. 24, p. 345-57.

HERRON M.M., 1980

The impact of volcanism on the chemical composition of Greenland ice sheet precipitation. A dissertation submitted to the faculty of the graduate school of the State University of New-York at Buffalo in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 158 p.

HERRON M.M., 1982

Glaciochemical dating techniques, American chemical society symposium series, Vol. 176, p. 303-18.,

HERRON M.M., 1982

Impurity sources of F^- Cl^- NO_3^- and SO_4^{--} in Greenland and Antarctic precipitation, Journal of Geophysical Research, Vol. 87, N° C4, p. 3052-60.

HERRON M.M. and HERRON S., 1983

Past atmospheric environments revealed by polar ice core studies, Journal des Sciences Hydrologiques, Vol. 28, p. 139-53.

HIDY F.B., ADAMOWICZ R.F., 1977

A model for rain composition and the washout of sulphur dioxide, Atmospheric Environment, Vol. 11, p. 917-27.

HILL R.D., RINKER R.G. and WILSON H.D., 1980

Atmospheric nitrogen fixation by lightning, Journal of Atmospheric Science, Vol. 37, p. 179-92.

HIRSCHBOECK, 1979

A new worldwide chronology of volcanic eruptions (with a summary of historical ash - producing activity and some implications for climatic trends of the last one hundred years), Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Vol. 29, p. 223-41.

HITCHCOCK D.R., SPILLER L.L. and WILSON W.E., 1980

Sulfuric acid aerosols and HCl release in coastal atmospheres : evidence of rapid formation of sulfuric acid particulates, Atmospheric environment, Vol. 14, p. 165-82.

HOGAN A., BARNARD S., SAMSON J. and WINTERS W., 1982

The transport of heat, water vapor and particulate material to the South Polar Plateau, Journal of Geophysical Research, Vol. 87, N° C6, p. 4287-92.

HOLLAND H.D., 1978

The chemistry of the atmosphere and oceans, Wiley-Interscience : New-York, Chapter 5.

HUEBERT B.J. and LAZRUS, 1980

Bulk composition of aerosols in the remote troposphere, Journal of Geophysical Research, Vol. 85, p. 7337-44.

IVANOV M.V. and FRENEY J.R., 1984

The global biogeochemical sulphur cycle, Scope 19 (Chapter 4).

JACKMAN C.H., FREDERICK J.E. and STOLARSKI R.S., 1980

Production of odd nitrogen in the stratosphere and mesosphere : an intercomparison of source strengths, J. Geophys. Res., 8, C12, p. 7495-7505.

JARDY A. et ROSSET R., 1979

Le couplage échange d'ions-conductimétrie : la chromatographie ionique, Analisis, Vol. 7, N° 6, p. 259-67.

JOHNSTON H.S., SERANG O, and PODOLSKE J., 1979

Instantaneous global nitrous oxide photochemical rates, J. Geophys. Res., 84, p. 5077-82.

JOUZEL J., MERLIVAT L., POURCHET M. and LORIUS C., 1979

A continuous record of artificial tritium fallout at the South Pole (1954-1978), Earth Planet. Sci. Lett., 45, p. 188-200.

JOUZEL J., MERLIVAT L., PETIT J.R. and LORIUS C., 1983

Climatic information over the last century deduced from a detailed isotopic record in the South Pole snow, Journal of Geophysical Research, Vol. 88, p. 2693-2703.

JUNGE C.E., 1963,

Air chemistry and radioactivity, Academic Press, New-York.

KEENE W.C., GALLOWAY J.N. and HOLDEN J.D. Jr., 1983

Measurement of weak organic acidity in precipitation from remote areas of the world, J. Geophys. Res., 88, p. 5122-30.

KELLOGG W.W., CADLE R.D., ALLEN E.R., LAZRUS A.L. and MARTELL E.A., 1972

The sulfur cycle, Science, 175, p. 587-96.

KLEY D., DRUMMOND J.W., FARLAND M. Mc. and LIU S.C., 1981

Tropospheric profiles of NO_x , Journal of Geophysical Research, Vol. 86, p. 3153-61.

KOTLYAKOV V.M., BARKOV N.I., LOSEVA I.A. and PETROV V.N., 1974

New map of the accumulation on the Antarctic Ice sheet, Academy of Sciences of the USSR (Section of Glaciology of the Soviet Geophysical Committee and Institute of Geography), Publication N° 24 (in Russian).

KOWALCZYK M.L. and BAUER E., 1982

Lightning as a source of NO_x in the troposphere, Pap. p. 1590, Institute for Defense Analysis, Arlington, Va.

KRITZ M.A. AND RANCHER J., 1980

Circulation of Na, Cl and Br in the tropical marine atmosphere, J. of Geophys. Res., 85, p. 1633-39.

KUMAI M., 1976

Identification of nuclei and concentration of chemical species in snow crystals samples at the South Pole, Journal of the Atmospheric Science, Vol. 33, p. 833-41.

KUNIMOTO Iwai, AKIRA Ono and TOMOYUKI Ito, 1981

On the composition and origin of large and giant particles observed at Syowa Station, Antarctica, Memoirs of National Institute of Polar Research, Special Issue N° 19, p. 131-40.

KYLE P., PALAIS J. and DELMAS R., 1982

The volcanic record of antarctic ice cores : preliminary results and potential for future investigations, Annals of Glaciology, p. 172-77.

LAIRD C.M., ZELLER E.J., ARMSTRONG T.P., 1982

Solar activity and nitrate deposition in South Pole snow, Geophysical Research Letters, Vol. 9, N° 10, p. 1195-98.

LAMB H.H., 1967,

The problem of Thomson Island : volcanic eruptions and meteorological evidence, Br. Antarct. Surv. Bull., N° 13, p. 85-88.

LAMB H.H., 1970

Volcanic dust in the atmosphere : with a chronology and assessment of its meteorological significance, Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 266, p. 425-533.

LAMBERT G., ARDOUIN B., SANAK J., LORIUS C. and POURCHET M., 1977

Accumulation of snow and radioactive debris in Antarctica : a possible refined radiochronology beyond reference levels, International Association of hydrological Sciences, Publication 118 (General Assembly of Grenoble, 1975 - Isotopes and Impurities in Snow and Ice), p. 156-58.

LAMBERT G., ARDOUIN B. and MESBAH-BENDEZU A., 1982

Atmosphere to snow transfers in Antarctica, Paper presented at 4th International Conference on Precipitation Scavenging, Dry Deposition and Resuspension, Sponsor, Los Angeles, Calif., Nov. 2 to Dec. 3.

LAZRUS A.L. and GANDRUD B.W., 1974

Stratospheric sulfate aerosol, Journal of Geophysical Research, Vol. 79, N° 24, p. 3424-31.

LAZRUS A.L., CADLE R.D., GANDRUD B.W., GRENBORG J.P., HUEBERT B.J. and ROSE W.I. Jr., 1979

Sulfur and halogen chemistry of the stratosphere and of volcanic eruption Plumes, J. of Geophys. Res., 84, C12, p. 7869-75.

LEGRAND M., 1980

Mesure de l'acidité et de la conductivité électrique des précipitations antarctiques. Thèse de 3e cycle, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, Publication N° 316 du Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, 109 p.

LEGRAND M., DELMAS R.J. and ARISTARAIN A., 1982

Acid titration of polar snow, Analytical Chemistry, Vol. 54, N° 8, p. 1336-39.

LEGRAND M., DE ANGELIS M. and DELMAS R.J., 1984

Ion chromatographic determination of common ions at ultratrace levels in antarctic snow and ice, Analytica Chimica Acta, 156, p. 181-92.

LEGRAND M. and DELMAS R., 1984

The ionic balance of antarctic snow : a 10 yr detailed record, Atmospheric Environment, Vol. 18, N° 9, p. 1867-74.

LEGRAND M. and DELMAS R., 1985.

Spatial and temporal variations of snow chemistry in Adelie Land (East Antarctica), Annals of Glaciology (sous presse).

LEVY H., MAHLMAN J.D., MOXIM W.J., 1980

A stratospheric source of reactive nitrogen in the unpolluted troposphere, Geophysical Research Letters, Vol. 7, N° 6, p. 441-44.

LIU S.C., FARLAND M. Mc. and KLEY D., 1983

Tropospheric NO_x and O_3 budgets in equatorial Pacific, Journal of Geophysical Research, Vol. 88, N° C2, p. 1360-68.

LOGAN J.A., PRATHER M.J., WOFSEY S.C., ELROY M.B., 1981

Tropospheric chemistry : a global perspective, Journal of Geophysical Research, Vol. 86, N° C8, p. 7210-7254.

LORIUS C., MERLIVAT L., JOUZEL J. and POURCHET M., 1979

A 30,000-Yr isotope climatic record from Antarctic ice, Nature, Vol. 280, N° 5724, p. 644-48

LORIUS C., RAYNAUD D., PETIT J.R., JOUZEL J. and MERLIVAT L., 1984

Late glacial maximum-Holocene atmospheric and ice thickness changes from Antarctic ice core studies., Annals of Glaciology (sous presse).

MACCAGNAN M., 1981

Contribution à l'étude des propriétés diélectriques de la glace antarctique, application géochimique. Thèse de 3e cycle, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, Publication N° 373 du Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement, 96 p.

MAENHAUT W., ZOLLER W.H., DUCE R.A. and HOFFMAN G., 1979

Concentration and size distribution of particulate trace elements in the South Polar atmosphere, Journal of Geophysical Research, Vol. 84, N° C5, p.2421-31.

MARTENS C.S., WESOLOWSKI J.J., HARRISS R.C. and KAIFER R., 1973

Chlorine loss from Puerto Rican and San Francisco Bay area marine aerosols, Journal of Geophysical Research, Vol. 78, p. 8778-92.

MILLOT G., 1963

Géologie des argiles : altérations, sédimentologie et géochimie, (Masson et Cie, ed.).

NEWHALL C.G. and SELF S., 1982

The Volcanic Explosivity Index (VEI) : an estimate of explosive magnitude for historical volcanism, Journal of Geophysical Research, Vol. 87, C7, p. 1231-38.

NGUYEN B.C., BERGERET C. and LAMBERT G., 1984

Exchange rates of dimethyl sulfide between ocean and atmosphere, In Gas transfer at water surfaces (W. Brunsart and G.H. Jaka eds.), Dordrecht : Reidel, p. 539-45.

OLIVER R.C., 1976

On the response of hemispheric mean temperature to stratospheric dust : an empirical approach, Journal of applied meteorology, Vol. 15, p. 933-50.

PALAIS J. and LEGRAND M., 1985

Soluble impurities in the Byrd Station ice core, Antarctica : their origin and sources, Journal of Geophysical Research, Vol. 90, N° C1, p. 1143-54.

PARK C., 1978

Nitric oxide production by Tunguska meteor, Acta Astronaut, Vol. 5, p. 523-42.

PARKER B.C., ZELLER E.J., HEISKELL L.E. and THOMPSON W.J., 1977

Nitrogen in South polar ice and snow : tool to measure past solar auroral, and cosmic ray activities, Antarctic Journal, October 1977, p. 133-34.

PARKER B.C. and ZELLER E.J., 1980

Nitrogenous chemical composition of antarctic ice and snow, Antarctic Journal of the U.S., Vol. 15, p. 79-81.

PARKER B.C. and ZELLER E.J., 1980

Nitrogenous chemical composition of antarctic ice and snow, Antarctic Journal of the U.S., Vol. 4, N° 5, p. 80-82.

PARKER B.C., THOMPSON W.J. and ZELLER E.J., 1981

Evaluation of ultraviolet spectrophotometric determination of nitrate-nitrogen in glacial snow, firn and ice, Analyst, August 1981, p. 898-901.

PARKER B.C., ZELLER E.J. and GOW A.J., 1982

Nitrate fluctuations in antarctic snow and firn : potential sources and mechanisms of formation, Annals of Glaciology, Vol. 3, p. 243-48.

PARUNGO F., ACKERMAN E., CALDWELL W. and WEICKMANN H.K., 1979

Individual particle analysis of Antarctic aerosols, Tellus, Vol. 31, p. 521-29.

PETIT J.R., BRIAT M. and ROYER A., 1981

Ice age aerosol content from East Antarctic ice core samples and past wind strength, Nature, Vol. 293, N° 5831, p. 391-94.

PETIT J.R., JOUZEL J., POURCHET M. and MERLIVAT L., 1982

A detailed study of snow accumulation and stable isotope content in Dome C (Antarctica), Journal of Geophysical Research, Vol. 87, N° C6, p. 4301-08.

PETIT J.R., 1982

Etude des aérosols insolubles déposés dans la neige antarctique, contributions à la datation des dépôts glaciaires et à la reconstitution du paléoenvironnement atmosphérique, Thèse de Doctorat d'Etat, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, Publication (sous presse) du Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, 278 p.

PETIT J.R., EZAT U., BARKOV N.I. and PETROV V.N., 1983

Identification of quartz microparticles in 20,000 BP antarctic ice samples : a signature of the last glacial environment, Scanning Electron Microscopy, p. 1627-33.

PICCIOTTO E.E. and WILGAIN S., 1963

Fission product in Antarctic snow, a reference level for measuring accumulation, Journal of Geophysical Research, Vol. 68, p. 5965-72.

PINGLOT J.F. and POURCHET M., 1981

Gamma ray bore-hole logging for the determination of radioactive fallout layers in snow. Colloque International sur les méthodes de comptage et la spectrométrie à de faibles concentrations, Berlin, Avril 1981, IAEA, S.M., p. 252-55.

POLIAN G. and LAMBERT G., 1979

Radon daughters and sulfur outputs from Erebus volcano (Antarctica), Journal of volcanology and geothermal research, Vol. 6, p. 125-37.

POLLACK J.B., TOON O.B., SAGAN C., SUMMERS A., BALDWIN B. and VAN CAMP W., 1976

Volcanic explosions and climatic change : a theoretical assessment, Journal of Geophysical Research, Vol. 81, N° 6, p. 1071-83.

POURCHET M., PINGLOT F. and LORIUS C., 1983

Some meteorological applications of radioactive fallout measurements in antarctic snows, Journal of Geophysical Research, Vol. 88, N° C10, p. 6013-6020.

PROSPERO J.M., GLACCUM R.A. and NEES R.T., 1981

Atmospheric transport of soil dust from Africa to South America, Nature, Vol. 289, p. 570-73.

PROSPERO J.M., CHARLSON R.J., MOHNEN V., JAENICKE R., DELANY A.C., MOYERS J., ZOLLER W. and RAHN K., 1983

Rev. Geophys. Space Phys., 21, 7, p. 1607-29.

RADKE L.F., 1982

Sulphur and sulfate from Mont Erebus, Nature, Vol. 299, p. 710-12.

RAGONE S.E. and FINELLI R.V., 1972

Cationic analysis of the Byrd Station, Antarctica, ice core, USA CREEL, Special Report 180.

RAISBECK G.M., YIOU F., FRUNEAU M., LOISEAUX J.M., LIEUVIN M., RAVEL J.C. and LORIUS C., 1981

Cosmogenic ^{10}Be concentrations in antarctic ice during the past 30,000 years, Nature, Vol. 292, p. 825-27.

RAMPINO M.A. and SELF S., 1982

Historic eruptions of Tambora (1815), Krakatoa (1883) and Agung (1963), their stratospheric aerosols, and climatic impact, Quaternary Research, Vol. 18, p. 127-43.

RAMPINO M. and SELF S., 1984

Les effets atmosphériques de l'éruption d'El Chichon, Pour la Science, Mars 1984, p. 12-23.

RASMUSSEN K.L., CLAUSEN H. and RISBO T., 1984

Nitrate in the Greenland ice sheet in the years following the 1908 Tunguska event, Icarus, 58, p. 101-108.

RAYNAUD D., LORIUS C., BUDD W.F. and YOUNG N.W., 1979

Ice flow along an IAGP flow-line and interpretation of data from an ice core in Terre Adélie (Antarctica), Journal of Glaciology, Vol. 24, N° 90, p. 103-115.

RAYNAUD D. and WHILLANS I., 1982

Air content of the Byrd core and past changes in the West Antarctic ice sheet, Annals of Glaciology, Vol. 3, p. 269-73.

RISBO T., CLAUSEN H.B. and RASMUSSEN K.L., 1981

Supernovae and nitrate in the Greenland Ice Sheet, Nature, Vol. 294, p. 637-39.

ROBBINS R.C., CADDLE R.D. and ECKHARDT D.L., 1969

The conversion of sodium chloride to hydrochloric acid in the atmosphere, J. Met., 16, p. 53-56.

ROBINSON E. and ROBBINS R., 1968

Emissions, concentrations and fate of gaseous atmospheric pollutants, 110 p.
SRI International, Menlo Park, Calif.

ROSSET R., CAUDE M., JARDY A., 1975

Manuel pratique de chromatographie en phase liquide, Varian, Orsay, p. 135.

RYAN J.A. and MUKHERJEE N.R., 1974

Estimate of tropospheric HCl cycle, report, 74 p. Mc Donnell, Douglas Co,
Huntington bend, Calif.

SCHWANDER J., 1984

Lufteteinschluss im Eis von Grönland und der Antarktis, Messung der Elektrischen
Leitfähigkeit von Eisproben für Klimatologische Anwendungen. Inauguraldisser-
tation der Philosophisch-Naturwissen-Schaflichen Fakultät der Universität Bern
zur erlangung der Doktorwürde-Druckerei der Universität Bern.

SELF S., RAMPINO M.R. and BARBERA J.J., 1981

The possible effects of large 19th and 20th century volcanic eruptions on
zonal and hemispheric surface temperatures, Journal of volcanology and
geothermal research, Vol. 11, p. 41-60.

SHAW G.E., 1979

Considerations on the origin and properties of the Antarctic aerosol, Rev.
Geophys. Space Phys., Vol. 17, p. 1983-98.

SHAW G.E., 1980

Optical, chemical and physical properties of aerosols over the Antarctic ice
sheet, Atmospheric Environment, Vol. 14, p. 911-21.

SHAW G.E., 1983

X-ray spectrometry of polar aerosols, Atmospheric Environment, Vol. 17,
N° 2, p. 329-39.

SHUMSKY P.A., KOROTKEVICH Ye. S, and LARINA T.B., 1980

The age of the ice in bore holes at Vostok and Vostok 1 stations, Inf. Bull.
Sov. Ant. Exp., N° 100, p. 41-48.

SINGH H.B., SALAS L.J., SHIGEISHI H. and SCRIBNER E., 1979

Atmospheric halocarbons, hydrocarbons and sulfur hexafluoride : global
distributions, sources and sinks, Science, Vol. 203, p. 899-903.

SODERLUND R. and SVENSSON B.H., 1976

The global nitrogen cycle, in Nitrogen, Phosphorus and Sulphur - global cycles, Scope Rep. 7, Ecol. Bull., Vol. 22, p. 23-74.

STEDMAN D.W., CHAMEIDES W.L. and CICERONE R.J., 1975

The vertical distribution of soluble gas in the troposphere, Geophysical Res. Lett., 2, p. 333-36.

STUMM W. and MORGAN J.J., 1970

"Aquatic-chemistry", Wiley-Interscience : New York, Chapter 8.

TAYLOR, 1964

Abundance of chemical elements in the continental crust : a new table, Geochimica Cosmochimica Acta, Vol. 28, p. 1273.

TUCK A.F., 1976

Production of nitrogen oxides by lightning discharges, Quaternary Journal of Meteorological Society, Vol. 102, p. 749-55.

TURCO R.P., TOON O.B., PARK C., WHITTEN R.C. and POLLACK J.B., 1982

An analysis of the physical, chemical, optical and historical impacts of the 1908 Tunguska Meteor Fall, Icarus, Vol. 50, p. 1-52.

VAN LOON H., 1966

The half yearly oscillations in middle and high Southern latitudes and the coreless winter, Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 24, p. 472-86.

WARBURTON J.A., CORNISH C.R., MOLENAR J.V., OWENS M.S. and YOUNG L.G., 1981

Meteorological and seasonal effects on snow chemistry of Ross Ice Shelf, Antarctica, J. Rech. Atmos., 15, N° 1, p. 17-37.

WEISS H., BERTINE K., KOIDE M. and GOLDBERG E.D., 1975

The chemical composition of a Greenland glacier, Geochimica and Cosmochimica Acta, Vol. 39, p. 1-10.

WETZEL R.A., ANDERSON C.L., SCHLEICHER H. and GROOM G.D., 1979

Determination of trace level ions by ion chromatography with concentrator columns, Analytical Chemistry, Vol. 51, N° 9, p. 1532-35.

WHITTEN R.C., CASTLEMAN A.W., CHU W.P., FARLOW N.H., HAMILL P., INN E.C.Y.,
KEESEEE R.G., Mc CORNICK M.P., POLLACK J.B., RUSSELL P.B., TOON O.B.,
TURCO R.P., 1982

The stratospheric aerosol layer - Topics in current physics N° 28.

WILLIAMS W.J., KOSTERS J.J., MURCRAY D.G., 1982

Nitric acid column densities over Antarctica, Journal of Geophysical Research, Vol. 78, N° 11, p. 8976-80.

WILSON A.T., HENDY C.H. and HARROWER K.L., 1978

The possibilities of determining past solar activity and of calculating carbon-14 dating corrections from chemical analyses of polar ice cores, New Zealand Antarct. Rec., 1 (3), p. 58-62.

YOUNG N.W., RAYNAUD D., DE ANGELIS M., PETIT J.R. and LORIUS C., 1984

Past changes of the Antarctic ice sheet in Terre Adelie as deduced from ice-core data and ice modelling, Annals of Glaciology (sous presse).

YUE G.K., MOHNEN V.A., KIANG C.S., 1976

A mechanism for hydrochloric acid production in cloud, Water Air Soil Pollution, Vol. 6, p. 277-94.

ZAFIRIOU O.C., 1975

Reaction of methyl halides with sea water and marine aerosols, J. Mar. Res., 33, p. 75-81.

ZANOLINI F., 1982

Conductimétrie et chimie de la glace à D 57 (Terre Adélie), application à la recherche du paléovolcanisme, Thèse de 3e cycle, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, Publication N° 76 du PIRPSEV (Programme Interdisciplinaire de Recherche sur la Prévision et la Surveillance des Eruptions Volcaniques, 84 p.

ZANOLINI F., DELMAS R. and LEGRAND M., 1985

Sulfuric and nitric acid concentrations and spikes along a 200 m deep ice core at D 57 (Adelie Land, Antarctica), Annals of Glaciology (sous presse).

Le but de ce travail était d'étudier la partie soluble (qui représente près de 90 % du total) des impuretés contenues dans les neiges et glaces antarctiques, afin de mieux comprendre la chimie atmosphérique actuelle et passée de la Terre. Lorsque nous avons entrepris ce travail, les seules mesures publiées étaient malheureusement fort dispersées géographiquement, couvraient des échelles de temps très diverses et avaient été obtenues par des techniques analytiques variées.

Grâce à deux techniques analytiques nouvelles très performantes (la mesure de la teneur en protons, encore appelée acidité forte, et la chromatographie ionique) que nous avons adaptées à l'étude des traces dans la neige, nous avons pu étudier de manière plus systématique cette partie soluble des impuretés. Après avoir résolu les délicats problèmes des contaminations, près de dix-mille mesures ont en effet été réalisées sur des échantillons provenant de différents sites de l'Antarctique (Byrd en Antarctique de l'Ouest, Pôle Sud en Antarctique central, Dôme C, Vostok et plusieurs sites de la Terre-Adélie en Antarctique de l'Est) et couvrant des échelles de temps allant de quelques années à quelques dizaines de milliers d'années.

Nous avons pu, grâce à cette bonne couverture spatio-temporelle, montrer que la partie soluble des impuretés est bien représentée par les ions Na , Mg , Ca , NH_4^+ , K^+ , H^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-} . Pour la première fois le nécessaire équilibre (balance ionique) entre cations et anions a pu être vérifié pour la neige et la glace antarctiques.

L'obtention d'une balance ionique bien équilibrée nous a alors permis de mettre en évidence que, dans les conditions climatiques actuelles, la neige contenait essentiellement du sel de mer (embruns marins) et surtout trois acides minéraux (sulfurique, nitrique et parfois chlorhydrique). Nous avons par ailleurs montré que durant la dernière glaciation (il y a 18 000 ans), la neige contenait une plus grande variété de composés chimiques solubles (des acides minéraux, du sel de mer mais aussi des composés tels que CaSO_4 et MgSO_4). La présence de ces derniers concorde exactement avec l'augmentation des teneurs en aluminium (traceur de l'aérosol continental) déjà observée dans cette neige ancienne.

Les teneurs en impuretés de la neige ont été étudiées en relation avec la chimie atmosphérique, le difficile problème posé par la relation air-neige étant abordé au cas par cas pour chaque composé présent. Cette étude a permis sinon de déterminer du moins de suggérer les sources des trois acides minéraux présents dans la neige se déposant actuellement en Antarctique.

Nos résultats suggèrent que l'acide sulfurique présent dans la neige, en période non volcanique, provient essentiellement de la conversion des composés soufrés (D.M.S. et H_2S) émis depuis la surface des océans par l'activité biogénique. Sur ce "bruit de fond" d'acide sulfurique, se superposent des fluctuations importantes mais de courte durée liées à l'activité volcanique explosive. Nous avons en particulier pu repérer dans la neige les retombées de très grandes éruptions telles que l'Agung (1963), le Krakatoa (1883) et le Tambora (en 1815). En outre, nos mesures montrent l'importance pour l'Hémisphère Sud d'une éruption survenue en

1822 (sans doute le Galunggung). Cette dernière éruption n'était pourtant pas jusqu'ici répertoriée parmi les très grandes éruptions dans les catalogues volcaniques. Notre couverture géographique de la "période Agung" a permis d'évaluer l'importance relative des deux mécanismes de retombées de l'acide sulfurique (dépôt sec et dépôt humide) dans la neige antarctique. Le dépôt sec, voisin de 30 % du total des retombées en zones côtières, atteint 70 % dans les régions centrales. La comparaison de nos résultats antarctiques (en termes de flux de retombées) avec ceux obtenus par Hammer au Groënland montre que pour des éruptions volcaniques géographiquement voisines (Indonésie pour l'Agung, le Krakatoa, le Tambora et peut-être aussi le Galunggung), la répartition des débris a pu néanmoins être fort différente entre les deux hémisphères. Ceci pose le problème des relations interhémisphériques en termes de circulation.

L'étude des impuretés d'origine marine (Na^+ et Cl^-) montre que le rapport Cl/Na dans la neige, voisin de la valeur de l'eau de mer (1,8) dans les régions côtières, devient très variable dans les régions centrales. Le bilan ionique équilibré a permis de démontrer que lorsque ce rapport est inférieur à 1,8 nous avons affaire à du sel de mer appauvri en chlore mais enrichi en sulfate. A l'inverse, les rapports supérieurs à 1,8 sont liés à la présence d'acide chlorhydrique ce qui suggère une altération de l'aérosol marin au cours de son transport à travers le continent antarctique par les composés acides tels que SO_2 ou H_2SO_4 présents dans l'atmosphère et confirme, à l'échelle de l'Antarctique, ce qui avait déjà été entrevu sur la chimie de l'aérosol marin. Le mécanisme suivant lequel ce gaz (HCl) se retrouve dans la neige n'a pu être entièrement élucidé.

Le cas de l'acide nitrique apparaît plus complexe encore, et nous n'avons pas toujours pu expliquer les variations géographiques des teneurs observées dans la neige. Nous avons cependant suggéré que l'essentiel de l'acide nitrique provient de l'oxydation de NO produit par les éclairs dans la haute troposphère. Par contre, nos résultats ne confirment pas du tout plusieurs hypothèses avancées antérieurement par d'autres concernant une modulation des teneurs en nitrate par l'activité solaire, la chute de météorites (Tunguska en 1908) et les tests nucléaires.

L'étude de la neige déposée durant la dernière glaciation a permis d'imaginer ce qu'était l'environnement atmosphérique passé de la Terre. Tout d'abord l'augmentation des teneurs en sodium et en chlore confirme l'hypothèse déjà émise d'une circulation atmosphérique plus vigoureuse à cette époque. De plus, en raison probablement de la forte turbulence de l'atmosphère, l'altération de cet aérosol marin semblait plus limitée que dans les conditions climatiques actuelles. Par ailleurs, l'augmentation des poussières insolubles d'origine terrigène, résultat d'un transport plus actif et d'une aridité plus marquée des continents à cette époque, s'accompagne de retombées de composés solubles tels que CaSO_4 et MgSO_4 . Par opposition aux aérosols marins et terrigènes, l'aérosol secondaire (qui provient de l'oxydation de certains gaz atmosphériques SO_2 , NO_x) semble peu modifié durant cette période. La faible augmentation des teneurs en acide sulfurique, observée essentiellement en zone côtière, semble liée non pas à l'activité volcanique, mais plutôt à l'activité biogénique de l'océan. Cependant ces résultats encore très nouveaux et trop ponctuels ne sont pas complètement discutés au niveau de ce travail.